

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ**

FAKULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF METROLOGY AND QUALITY ASSURANCE  
TESTING

## **KALIBRACE A NÁVRH REPASE UNIVERSÁLNÍHO MĚŘÍCÍHO MIKROSKOPU**

CALIBRATION AND CONCEPT OF RENOVATION OF UNIVERSAL MEASUREMENT  
MICROSCOPE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JAROSLAV VOJTA**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. VLADIMÍR PATA, Dr.**

BRNO 2008

## **ANOTACE:**

Bc. Jaroslav Vojta

*Kalibrace a návrh repase universálního měřicího mikroskopu*

Diplomová práce, Ústav metrologie a zkušebnictví, VUT FSI v Brně.

Tato práce je zaměřená na laserový měřicí systém. Komplexně popisuje jednotlivé složky laserového systému, jeho aplikaci při kalibraci, následné vyhodnocení výsledků a učinění obnovy mikroskopu.

**Klíčová slova:** laserový systém Renishaw, postup kalibrace mikroskopu PK3, popis norem ČSN ISO 230, repase mikroskopu

## **ANNOTATION:**

Bc. Jaroslav Vojta

*Calibration and concept of renovation of universal measurement microscope*

Master's thesis, Faculty of mechanical engineering, Institute of metrology and quality assurance testing, VUT in Brno.

This thesis is focused on laser measuring system. It describes comprehensively single components of laser system, its application within calibration, subsequent evaluation of results and performance of renovation of the microscope.

**Key words:** Renishaw Laser System, procedure of calibration of microscope PK3, description of standards ČSN ISO 230, renovation of microscope.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

VOJTA, J. *Kalibrace a návrh repase universálního měřicího mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně. Při vypracování diplomové práce jsem respektoval ustanovení předpisů pro diplomové práce a jsem si vědom toho, že v případě jejich nedodržení nebude moje diplomová práce vedoucím diplomové práce přijata.

V Brně dne 4. května 2008

.....

### **Poděkování:**

Tímto chci poděkovat Aleši Prokopovi za pomoc při měření a podporu při psaní diplomové práce. Lucii Mirandové chci poděkovat za korekturu a za pomoc při podpoře během studia. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě vždy pomáhala jak při studiu tak v životě. V neposlední řadě chci poděkovat mému vedoucímu doc. Ing. Vladimíru Patovi, Dr. za cenné připomínky při psaní diplomové práce a vstřícnému přístupu nejen ke mě, ale i ostatním studentům.

# OBSAH

Úvod.....	8
1 Vznik laseru .....	9
1.1 Princip laseru .....	9
1.2 Vlastnosti laserového paprsku .....	10
2 Základní princip interferometrie .....	10
3 Systém ML10 gold standart .....	12
3.1 Laserová hlavice ML10 Gold Standart .....	12
3.1.1 Popis otočné laserové hlavy .....	14
3.2 Kompenzační jednotka EC10 .....	14
3.2.1 Čidla jednotky EC10.....	16
3.2.2 Kompenzace teplotní roztažnosti materiálu .....	16
3.3 Software Renishaw Laser10 .....	18
3.4 Možnosti využití laserového interferometru .....	19
3.4.1 Lineární měření pomocí laserového interferometru .....	21
3.5 Faktory ovlivňující lineární měření .....	23
3.5.1 Mrtvý chod .....	23
3.5.2 Kosinová chyba.....	24
3.5.3 Abbeho chyba .....	25
3.6 Prvky pro lineární měření .....	25
4 Popis norem ČSN ISO 230 .....	26
4.1 Norma ČSN ISO 230 – 2 .....	26
4.1.1 Rozsah dráhy v ose .....	26
4.1.2 Měřený rozsah dráhy .....	26
4.1.3 Zadaná poloha.....	26
4.1.4 Skutečná poloha .....	26
4.1.5 Úchylka polohy; polohová úchylka .....	26
4.1.6 Jednostranný .....	27
4.1.7 Dvoustranný.....	27
4.1.8 Rozšířená nejistota .....	27
4.1.9 Koeficient rozšíření.....	27
4.1.10 Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze .....	27
4.1.11 Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze .....	27

4.1.12	Necitlivost v poloze .....	27
4.1.13	Necitlivost v ose B .....	28
4.1.14	Průměrná necitlivost v ose .....	28
4.1.15	Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v poloze .....	28
4.1.16	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze .....	28
4.1.17	Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy poloze .....	28
4.1.18	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose .....	28
4.1.19	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose .....	29
4.1.20	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose .....	29
4.1.21	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose .....	29
4.1.22	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose .....	29
4.1.23	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose .....	30
5	Typy měřících cyklů .....	31
5.1	Lineární měřící cykly .....	31
5.2	Pendulární měřící cykly .....	31
6	Universální dílenský mikroskop PK3 .....	32
7	Monitorovací systém COMET MS4+ .....	33
8	Vlastní realizace měření .....	34
8.1	Postup při měření polohy pro osu X před repasí .....	34
8.1.1	Seřízení laserové paprsku v ose X .....	40
8.1.2	Měření polohy v ose X před repasí .....	43
8.2	Postup při měření polohy pro osu Y před repasí .....	44
8.2.1	Měření polohy v ose Y před repasí .....	45
8.3	Postup při měření polohy pro osu X po repasi .....	46
8.3.2	Měření polohy v ose X po repasi .....	47
8.4	Postup při měření polohy pro osu Y po repasi .....	47
8.4.1	Měření polohy v ose Y po repasi .....	48
9	Výsledky kalibrace .....	48
9.1	Převod naměřených dat .....	48
9.2	Testování naměřených hodnot na hrubou chybu .....	49
9.3	Postup při výpočtu výsledků kalibrace .....	50
9.4	Výsledky v ose X před repasí .....	54
9.5	Výsledky v ose Y před repasí .....	54
9.6	Výsledky v ose X po repasi .....	55

9.7 Výsledky v ose Y po repasi .....	55
10 Repase mikroskopu PK3 .....	56
10.1 Realizace repase .....	56
10.2 Finanční náročnost repase .....	58
11 Závěr .....	58
Použitá literatura .....	60
Použitý software .....	60
Seznam obrázků .....	61
Seznam tabulek .....	63
Použité zařízení .....	63
Seznam příloh .....	63

## ÚVOD

Člověk se postupem času vyvíjí a ruku v ruce s ním se mění okolí, ve kterém se pohybuje a žije. Potřeba přetvářet okolní prostředí k obrazu svému lidé chtěli již od pradávna. S vývojem lidstva postupovala paralelně i technika měření. Některé národy v době středověku měli již vyspělý měřicí systém, který dokázali aplikovat při stavbách pyramid, silnic, zavodňovacích kanálů apod. Definice jejich měř byla však nedokonalá a nestálá v důsledku odvozování měř z některých významných částí živých či neživých objektů. V průběhu staletého vývoje dochází vlivem větší náročnosti na přesnost a kvalitu výrobků k přesným definicím délek a výzkumu moderních přístrojů na jejich měření. Jedním ze špičkových přístrojů dnešní moderní doby určených k měření je laser.

Laserové systémy jsou všude kolem nás, i když si to mnozí z nás neuvědomují. Skoro každý vlastní přehrávač kompaktních disků, kde laser je jeho hlavní součástí. Dále je to medicína, kde se uplatňuje laser jako prostředek pro léčbu rakoviny, očních vad, kožních chorob apod. Ve stavebnictví má široké využití při stavbách tunelů, budov, mostů a to vše s milimetrovou přesností. Výpočetní technika se bez laseru v dnešní době obejde jen stěží. Výroba mikroprocesorů je tak náročná na přesnost, že jedině laser dokáže tuto úlohu splnit. Při komunikaci se pomocí laserového paprsku a skelných vláken dokáže přenést neuvěřitelné množství dat během okamžiku. V neposlední řadě se otvírá brána laseru zábavnému průmyslu. Zde je využíván jako zobrazovač hologramů, reklamních upoutávek, iluzí apod. O vytyčení oblasti působnosti laseru by mohlo být popsáno mnoho stran, ovšem tato diplomová práce se orientuje na měření délkové.

Vlastní práce se pomyslně dělí na dvě hlavní části. Na teoretickou a část druhou, praktickou. Teoretická část obsahuje popis jednotlivých částí a objektů, které jsou použity nebo jsou spjaty s částí praktickou. Jedná se zejména o mikroskop PK3, laserový systém Renishaw, rozbor ISO norem řady 230, principy interferometrie apod. Praktická část je zaměřena na přesný popis všech úkonů, které jsou potřebné k úspěšnému seřízení laserového systému a následnému měření polohy na mikrometrickém šroubu. Na základě naměřených výsledků při měření polohy se rozhoduje o repasi mikroskopu, který byl v nedávné době přesunut. Naměřené hodnoty nám ukáží, že mikrometrický šroub pracuje ve stanovené přesnosti i po přesunu a provedené repasi. Repase se skládá z obnovy elektroniky a osvětlení okulárů. Na konci je proveden finanční rozbor repase.



## 1 VZNIK LASERU

Během druhé světové války se začali používat radiolokátory, které pomocí elektromagnetických vln o malé vlnové délce (mikrovln) dokázali detekovat pohyb nepřátelských letadel. Po válce inženýři intenzivně zkoumali možnosti, které by vedly ke zlepšení parametrů zařízení, pracujících na principu mikrovln. Fyzikové se proto vrátili k Einsteinově teorii stimulované emise záření, která praví:

Za určitých okolností může dojít k tzv. vynucené, neboli stimulované emisi. Mohlo by k ní dojít za situace, kdy by se atomy nacházely na vyšší energetické hladině a nenastala by spontánní emise. Pak by bylo možno „donutit“ je k vyzařování přebytečné energie vhodným fotonem zvenčí. Výsledkem by bylo, že slabý světelný impuls vyvolá vznik světla mnohem silnějšího [1].

V tuto dobu, kdy Einstein s myšlenkou přišel se psal rok 1917 a nebylo technicky možné tuto myšlenku uvést do praxe.

V roce 1954 vzniklo první zařízení, které pracovalo na principu Einsteinovy teorie stimulované emise záření. Pracovalo s mikrovlnným zářením a jmenovalo se **maser**, odvozené od zkratky *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření). Maser umožňoval zesilovat velmi slabé signály z vesmíru, stal se také nejpřesnějším zařízením pro měření času na světě.



Obr. 1 Theodore Mainman  
(převzato z [www.cez.cz](http://www.cez.cz))

Od tohoto okamžiku byl již malý krůček ke vzniku **laseru** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), který pracuje místo mikrovln se stimulovanou emisí světla. Jako první toho dosáhl v roce 1960 Theodore Maiman (obr. 1). Sestrojil laser jehož aktivní látkou byl syntetický rubín. Prototyp byl na dnešní poměry velmi primitivní, nicméně z jeho koncepce vychází všechny dnešní moderní lasery. V současné době existuje mnoho druhů laserů (helium-neonový, Titan-safírový, CO, atd.)

### 1.1 Princip laseru

Běžné světlo, které vidíme v přírodě je nekoherentní. To znamená, že fotony, které jsou vyzařovány atomy mají různý směr pohybu a jsou na sobě nezávislé. Světlo laseru je oproti

běžnému světlu „disciplinované“, vyzáření probíhá ve stejný čas, stejným směrem. Jak bylo řečeno, laser potřebuje nucenou stimulaci atomů. Tyto atomy se v rubínovém laseru vybudí pomocí světla z výbojky. Ta má za následek, že atomy se dostanou ze základní energetické hladiny E1 na vyšší energetickou hladinu E2 a posléze na metastabilní hladinu Em. Zde setrvávají určitou dobu. Jakmile se objeví stimulující atom červeného světla vrátí se zpět na základní energetickou hladinu E1 všechny atomy, přičemž vyzáří fotony ve formě červeného světla. Takže jeden stimulující atom červeného světla dokázal emitovat více atomů, které vyzářili přebytek své energie v podobě červeného světla.

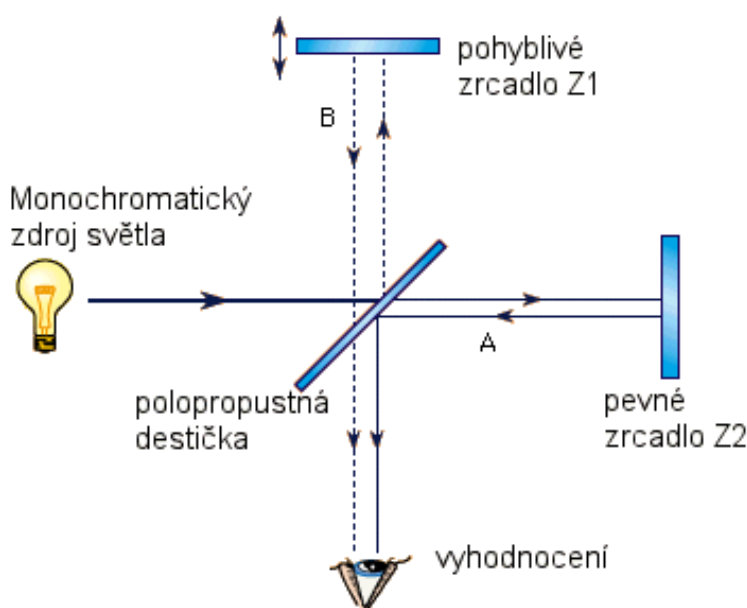
## 1.2 Vlastnosti laserového paprsku

*Koherence* – laserový paprsek má vždy stejnou frekvenci, směr i fázi (případně stejný fázový posun).

*Monochromatické světlo* – má pouze jednu vlnovou délku. Běžné zdroje světla mají více vlnových délek. Použitím barevných filtrů lze vytvořit „monochromatické světlo“, ale není úplně čisté. Skutečné monochromatické světlo vytvoří pouze laser.

*Vlnová délka* – je délka, kterou urazí laserové vlnění za jeden kmit. Tato délka se označuje lambda a má velice malou hodnotu. To nám umožňuje měřit s vysokým rozlišením.

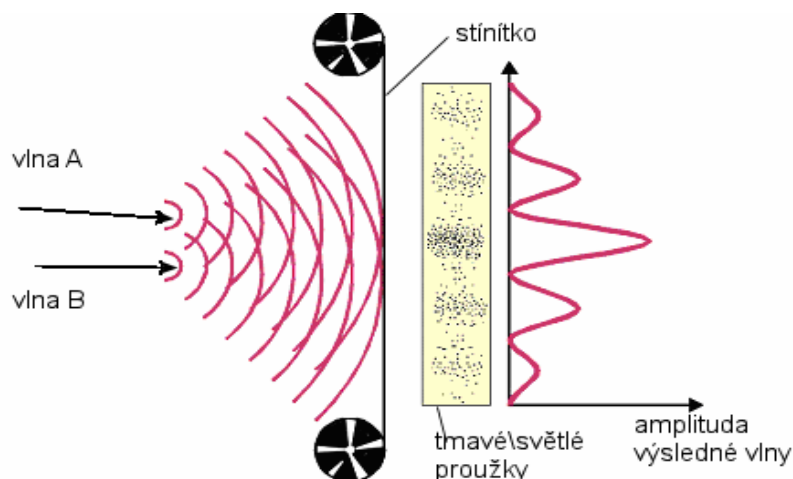
## 2 ZÁKLADNÍ PRINCIP INTERFEROMETRIE



Obr. 2 Michelsonův interferometer

Paprsek ze zdroje monochromatického světla dopadá na postříbřenou polopropustnou destičku. Destička je nastavená pod úhlem 45° a dělí paprsek na dva směry. První dopadá na pevné zrcadlo Z2 a od něj se odráží zpět do polopropustné destičky. Druhý paprsek dopadá na pohyblivé zrcadlo Z1 a odráží se také zpět do polopropustné destičky. Zde se

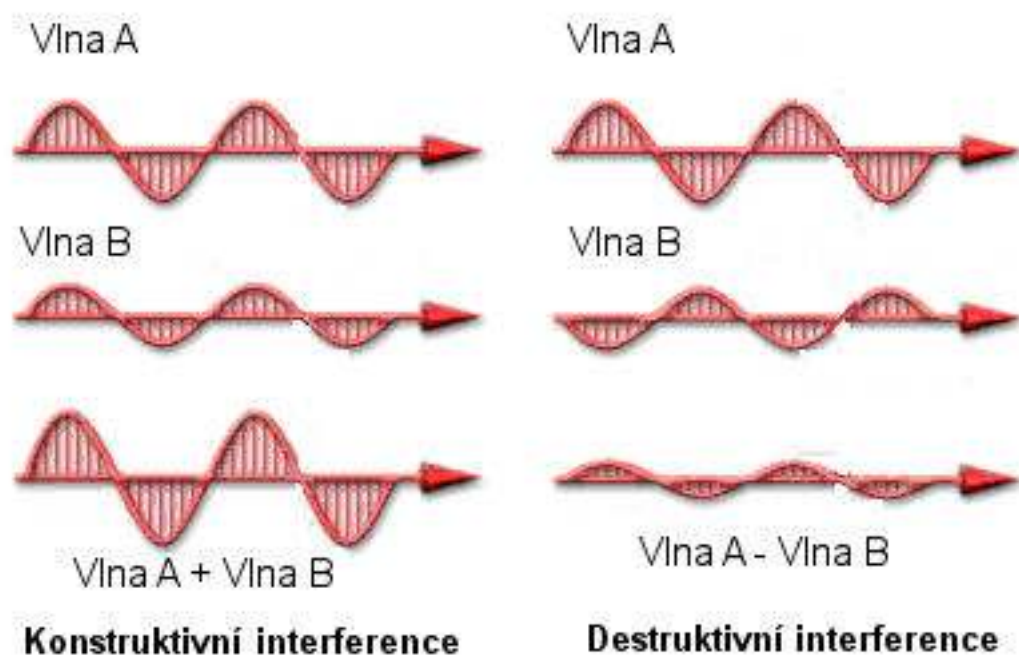
oba paprsky odráží do vyhodnocovací jednotky a část se odráží zpět do zdroje světla (není zakresleno). Vyhodnocující jednotka detekuje interferenci paprsků. Počet interferenčních proužků vzniklých při interferenci na stínítku je mírou změny vzdálenosti pohyblivého zrcadla Z1.



Obr. 3 Interferující vlny na stínítku

Druhy interference:

- *Konstruktivní* – obě vlny mají stejnou fázi a frekvenci. Dochází k součtu obou vln a zesílení paprsku (zvětšení amplitudy, viz obr. 4). Výsledný interferenční proužek má světlou barvu, kterou můžeme vidět na stínítku Michelsonova interferometru (obr. 3).



Obr. 4 Interference vln

- *Destruktivní* – obě vlny mají opačnou fázi. Dochází k rozdílu obou vln a zeslabení vlny (obr. 4). Výsledný interferenční proužek má tmavou barvu, kterou můžeme vidět na stínítku Michelsonova interferometru (obr. 3).

### 3 SYSTÉM ML10 GOLD STANDART

Společnost Renishaw má světové prvenství v průmyslové metrologii a spektroskopii. Nabízí zlepšení produktivity ve výrobě i výzkumu. Laserový interferometrický systém ML10 Gold Standart umožňuje kalibrování, měření geometrických i dynamických vlastností strojů. Díky přesnosti  $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$  plně vyhovuje mezinárodním standardům. ML10 Gold Standart se používá při komplexním vyhodnocení přesnosti obráběcích strojů, SMS a jiných systému s vysokými nároky na přesnost najíždění polohy. Celý systém je vytvořen na základě modulární architektury, která umožňuje použít různé druhy součástí a tím rozšířit možnosti měření.

#### 3.1 Laserová hlavice ML10 Gold Standart

Tvoří základ měřicího systému Renishaw. Samotný laser je realizován jako Helium-Neonový, který byl poprvé zkonstruován v roce 1961 Ali Javanem a jeho spolupracovníky v laboratořích Bell. Historie laseru ML10 sahá do roku 1988 kdy byl poprvé uveden na trh. V roce 1991 došlo k jeho úpravě a vylepšení, které obsahovalo i dynamický sběr dat. V roce 2001 byl představen laser ML10 Gold (obr. 1) a po 6 letech vznikla zatím konečná verze laseru s názvem XL80 s 50Hz frekvencí paprsku (frekvence u ML10 je 5Hz).



Obr. 5 Laserová hlavice ML10 Gold Standart a XL80 (vpravo)

Tabulka č.1 Základní specifikace ML10 Gold

Rozměry	335 mm x 176 mm x 75 mm
Hmotnost	4,5 kg
Měřicí rozsah	40 m
Typ laseru	Helium neon (HeNe), laser II třídy
Výkon laseru	<1 mW
Vlnová délka ve vakuu	632,990577 nm
Přesnost kmitočtu laseru	$\pm 0,05$ ppm
Rozlišitelnost	1 nm
Napájení	Jmenovité napětí 100 až 240 V, 50/60 Hz, automatická detekce (mezní rozpětí: 85–265 V)
Pracovní teplota	0 °C - 40 °C (32 °F - 104 °F)
Provozní vlhkost	0% - 95% nekondenzující



Obr. 6 Zadní panel laserové hlavičky ML10

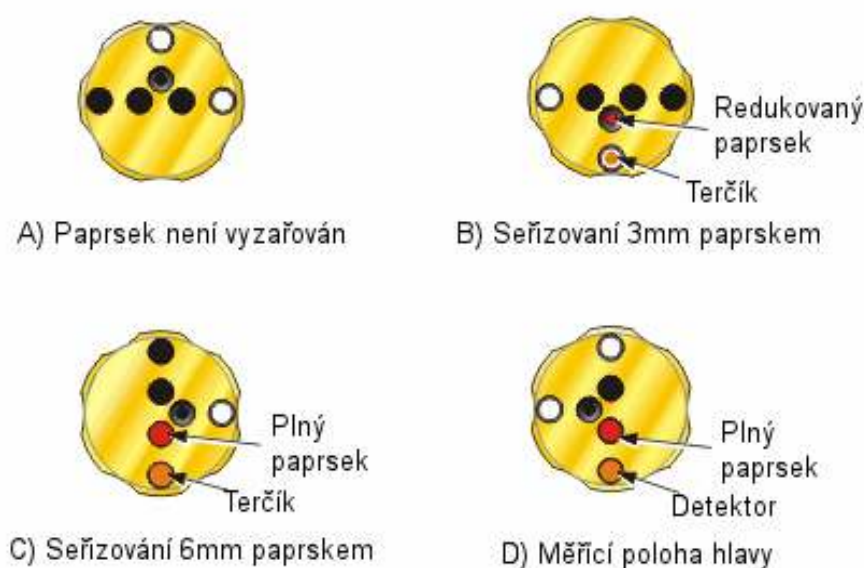
**Kalibrace ML10:**

Pokud chceme udržovat systém Renishaw s danou přesností měření, potom se doporučuje kalibrovat ML10 laser každé dva až tři roky. Častější kalibrace se doporučuje zejména, když se zařízení používá v extrémních podmínkách, nebo jsme zjistili nějaké poškození. Požadavky na hodnocení kvality výrobního procesu, nebo národních pravidel a norem mohou také doporučovat častější rekaliibraci. Také v průběhu uskladnění, transportu a použití, by nemělo být zařízení vystavené nadměrným otřesům, vibracím nebo extrémním teplotám. Vlnová frekvence každé laserové hlavy ML10 je kalibrována a dokladována

prostřednictvím jódem stabilizovaného laseru, který je navázán na standardy britského ústavu NPL (National Physics laboratory) v Londýně.

### 3.1.1 Popis otočné laserové hlavy

Princip funkce laserového systému ML10 Gold Standart je obdobná jako u Michelsonova interferometru s tím rozdílem, že interferující paprsky se vrací zpět do ML10, kde se vyhodnocují vyspělou elektronikou. Pro nastavení hlavy do různých pozic postupujeme podle obrázku č. 7.

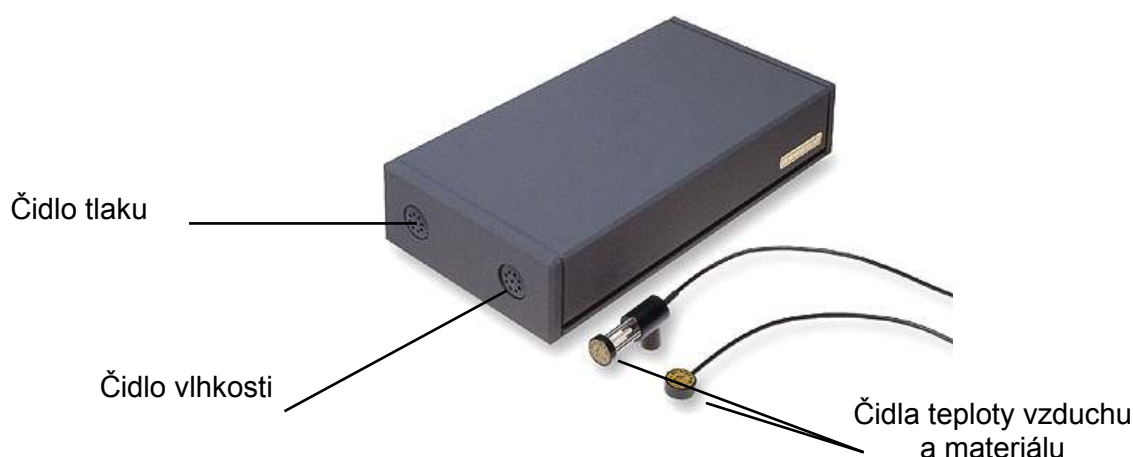


Obr. 7 Polohy měřicí hlavy

## 3.2 Kompenzační jednotka EC10

Kompenzační jednotka EC10 Gold Standard pracuje s laserovým systémem ML10 Gold Standard, přičemž neustále sleduje okolní prostředí prostřednictvím vysoce přesných snímačů, které měří teplotu, tlak a vlhkost vzduchu. V jednotce se pak vypočítá skutečná vlnová délka laseru, aby byla zaručena přesnost měření [2].

K jednotka EC10 mohou být připojena až 3 materiálová teplotní čidla a jedno čidlo pro teplotu vzduchu. Pomocí tří snímačů teploty materiálu dokáže jednotka kompenzovat i teplotní roztažnost stroje, což je zvláště důležité u rozměrných strojů a u strojů vyrobených z vysoce roztažných materiálů. Další dvě čidla na měření tlaku a relativní vlhkosti jsou integrována v přední části EC10. EC10 Gold Standart poskytuje lepší výsledky kompenzace než předchozí EC10s.



Obr. 8 Kompenzační jednotka EC10

**Poznámka:** Před zapojením materiálového a teplotního čidla musí být EC10 vypnuta. Pokud tomu tak není a čidla připojíme až po spuštění, kompenzační jednotka tyto čidla nedetekuje. Pokud používáme méně než 3 materiálová čidla, musíme je zapojit ve vzestupném pořadí. Délka kabelů činí 5m, avšak maximální délka, kterou můžeme použít je 20m.

Tabulka č.2 Specifikace jednotky EC10

Rozměry (mm)	335 x 176 x 75
Hmotnost (g)	4000
Rozsah teploty vzduchu	0–40° C
Přesnost teploty vzduchu	± 0,3 °C
Rozsah tlaku vzduchu	750–1 150 mbar
Přesnost tlaku vzduchu	± 1,1 mbar
Rozsah relativní vlhkosti	0–95 % (nekondenzující)
Přesnost relativní vlhkosti	20% RH
Přesnost kompenzace vlnové délky	± 0,7 ppm (parts per million)
Rozsah teploty materiálu	0–40° C
Přesnost teploty materiálu	± 0,1 °C
Napájení	Přepínatelný duální režim 100– 120 V stř., 200– 240 V stř. (nominální)

Měřicí senzory EC10 jsou kalibrovány jednou ročně. Pro častější kalibrování platí stejné podmínky jako pro laserovou hlavici ML10. Přesnost laserového systému pro lineární měření závisí nejen na stabilizaci vlnové délky paprsku, ale i na parametrech vnějšího prostředí. Obzvláště hodnoty teploty vzduchu, tlaku a relativní vlhkosti ovlivňují vlnovou



délku laserového svazku. Pokud při lineárním měření nepoužíváme kompenzační jednotku, pak chyba způsobená okolním prostředím může být až 50 ppm (50 μm na jeden metr délky, viz obr. 9) Dokonce i v místnosti kde se teplota udržuje přibližně na stejné úrovni dojde při každodenní změně tlaku vzduchu k chybě 20 ppm. Chyba měření přibližně 1 ppm vznikne v každém prostředí, kde se podmínky prostředí změni:

- Teplota vzduchu o 1 °C
- Tlak vzduchu o 3,3 mbar
- Relativní vlhkost vzduchu o 30%

EC10 je samočinná jednotka, která přizpůsobuje laserový paprsek okolnímu prostředí. V pravidelných intervalech zjišťuje údaje z čidel a úměrně tomu mění vlnovou délku laseru. Korekce vlnové délky platí pouze pro lineární měření. Pro jiné měření (úhlů, rovinnosti, přímosti atd.) jsou vlivy vnějšího prostředí daleko méně významné. Je to dáno tím, že změna okolních podmínek změni oba paprsky (měřicí i referenční) stejně. Při lineárním měření je délka referenčního a měřicího paprsku odlišná.

### 3.2.1 Čidla jednotky EC10

*Čidlo teploty vzduchu* - je silně zmagnetováno a proto jej můžeme s výhodou upevňovat přímo na měřený stroj. Mělo by být umístěno co nejbližší laserovému paprsku přibližně v ½ jeho dráhy. Při měření dlouhých vzdáleností, nutná kontrola vzdušných teplotních gradientů. Je-li teplotní gradient víc než 1 °C, použijeme ventilátor pro cirkulaci vzduchu a udržení požadovaného rozmezí teplot.

*Čidlo tlaku / vlhkosti vzduchu* – je integrováno uvnitř EC10. Obecně není nutné aby čidla byla přímo u laserového paprsku. Je to dáno tím, že změna tlaku a vlhkosti je v celém prostoru měření téměř stejná. Při kalibraci vertikální osy přes 10 m dlouhé je doporučeno umístit kompenzační jednotku do středu laserového paprsku.

*Čidlo teploty materiálu* – umísťuje se v blízkosti měřené části stroje. Je silně magnetické, proto pozor na okolní přístroje. Pozornost při zapojení do EC10.

### 3.2.2 Kompenzace teplotní roztažnosti materiálu

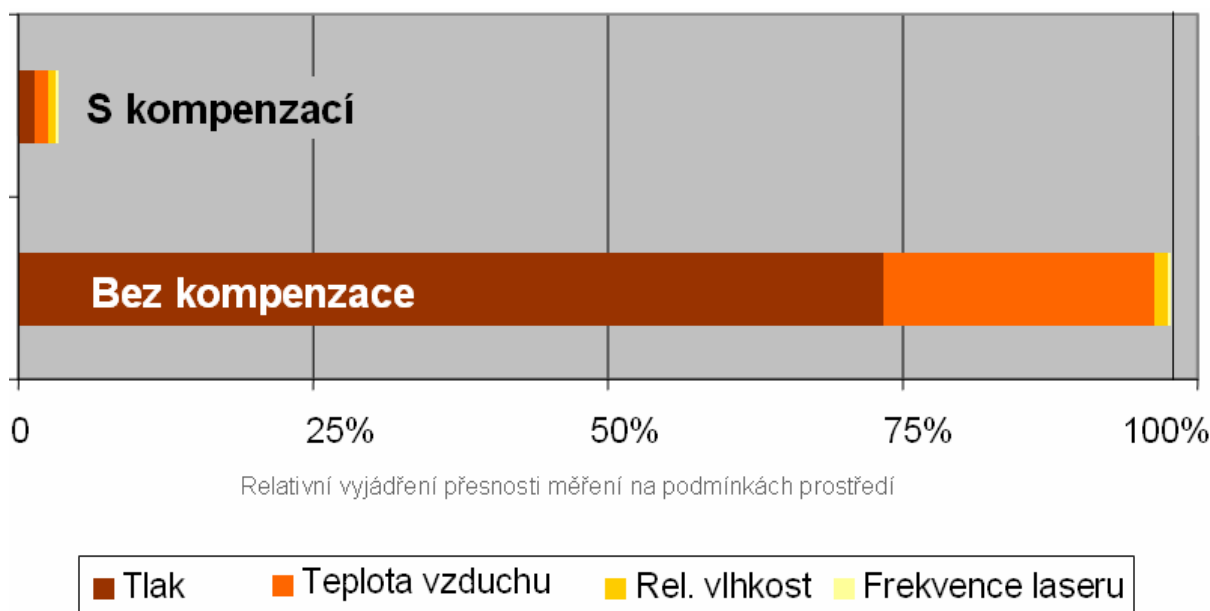
Mezinárodní teplota používaná ke kalibrování je 20 °C. Souřadnicové měřicí stroje a obráběcí stroje jsou kalibrovány právě s ohledem na tuto teplotu. V prostředí továren je regulace teploty často nedostupná, proto stroje ve 20 °C často nepracují. U většiny materiálů



dochází vlivem teplot ke rozpínání, nebo smršťování. Vyhnout se této chybě během kalibrování je nutné, proto software od firmy Renishaw zahrnuje tzv. matematickou korekci známou jako kompenzace teplotní roztažnosti. Software normalizuje naměřené hodnoty použitím indexu roztažnosti materiálu, který musíme manuálně zadat a také střední teplotu přístroje naměřenou jednotkou EC10. Cílem této korekce je odhadnout výsledky kalibrování, které by byly získané při 20 °C.

Většina materiálů se rozšiřuje, nebo smršťuje se změnou teploty jen velmi málo. Z tohoto důvodu je koeficient teplotní roztažnosti udávám v ppm/°C (parts per million per degree °C). Tento koeficient tedy vypovídá o kolik se změní délka materiálu při změně teploty o 1 °C. Například koeficient +13 ppm/°C znamená, že při změně teploty o 1 °C dojde na jednom metru materiálu k prodloužení o 13 μm. Nesprávná náhrada koeficientu tepelné roztažnosti je jedním z primárních zdrojů chyby v lineárním měření (v prostředí, kde se nereguluje teplota). To je zapříčiněno tím, že koeficienty roztažnosti běžných technických materiálů jsou relativně velké ve srovnání s chybou vlnové délky nejkuli chybou měření (mrtvý chod, Abbeho chyba, atd.)

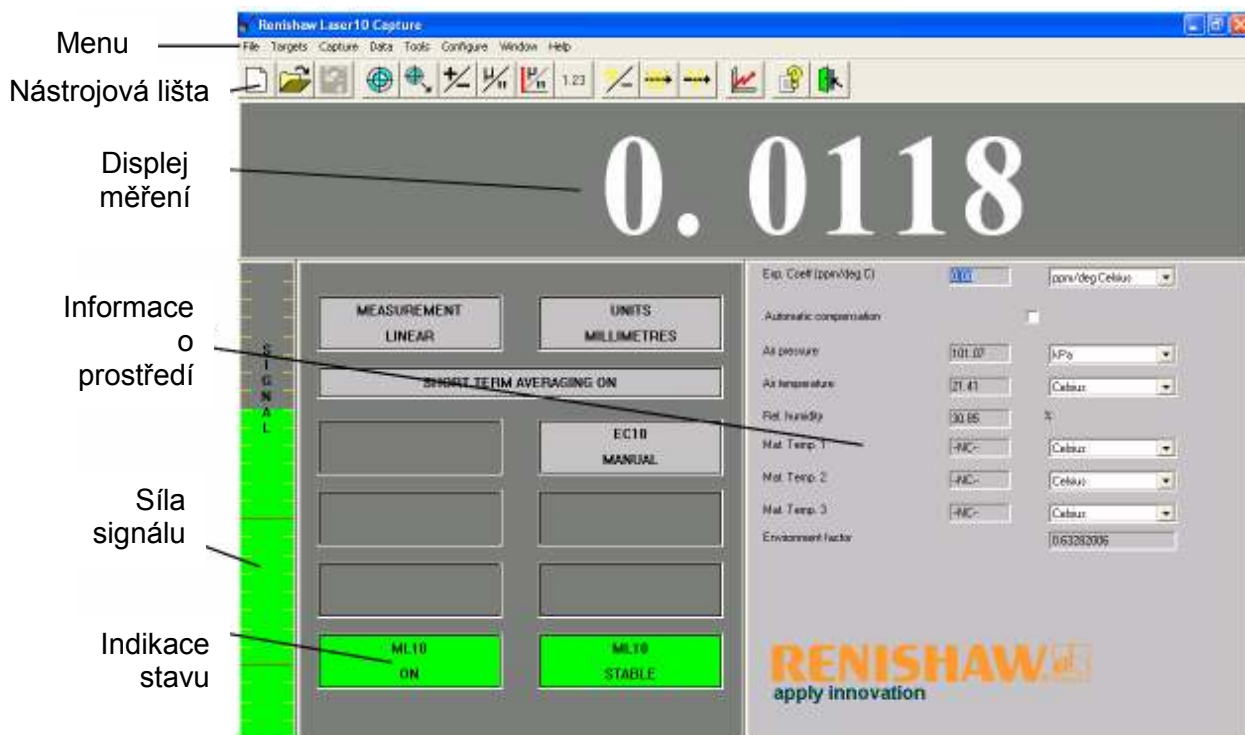
Při normalizaci naměřených hodnot vzniká chyba, která se vztahuje k přesnosti měření snímače teploty materiálu. Velikost této chyby závisí na teplotním koeficientu roztažnosti stroje. Materiální snímač má přesnost  $\pm 0,1$  °C a jestli je koeficient roztažnosti 10 ppm/°C, pak chyba při normalizaci měření je  $\pm 1$  ppm.



Obr. 9 Vliv kompenzace podmínek prostředí na přesnost měření

**Poznámka:** přesnost kompenzace podmínek prostředí je mnohem důležitější než stabilita frekvence laserové hlavičky.

### 3.3 Software Renishaw Laser10



Obr. 10 Program Renishaw Laser10



**Nové měření** – vede nás krok za krokem nastavením, vyplnění některých položek probíhá automaticky



**Otevřít** – možnost otevřít předchozí uložené měření



**Uložit** – toto tlačítko umožňuje uložit naměřená data



**Nulování** – umožní nulování před započítáním měření



**Nastavení první hodnoty** – umožňuje přednastavit počáteční hodnotu měření od které se budou odpočítávat další hodnoty



**Změna směru měření** – mění znaménko naměřeného čísla zobrazeného na displeji



**Změna zobrazení jednotek** – mění jednotky naměřených hodnot mezi mikrometry a palci



**Změna chybových jednotek** – mění jednotky chyb mezi mikrometry a palci



**Rozlišení displeje** – umožňuje nastavit počet desetinných míst na displeji měření



**Průměrování** – pomáhá předcházet změnám aktuálních výsledků na měřicím displeji, které mohou kolísat z důvodu chvění, nestability či jiných vnějších vlivů. Jsou k dispozici 2 druhy průměrování. Krátké a dlouhé.



**Krátké průměrování** – program průměruje 256 po sobě jdoucích naměřených hodnot z laseru v čase pouze 250 milisekund. Výsledek se zobrazí na displeji měření.



**Dlouhé průměrování** – program průměruje 4096 po sobě jdoucích naměřených hodnot z laseru v čase 4 sekundy. Výsledek se zobrazí na displeji měření.



**Analýza** – spustí se program Renishaw Laser10 pro analýzu dat.



**Nápověda**






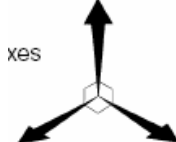


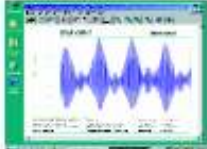


**Ukončit** – zavře se program pro snímání dat.

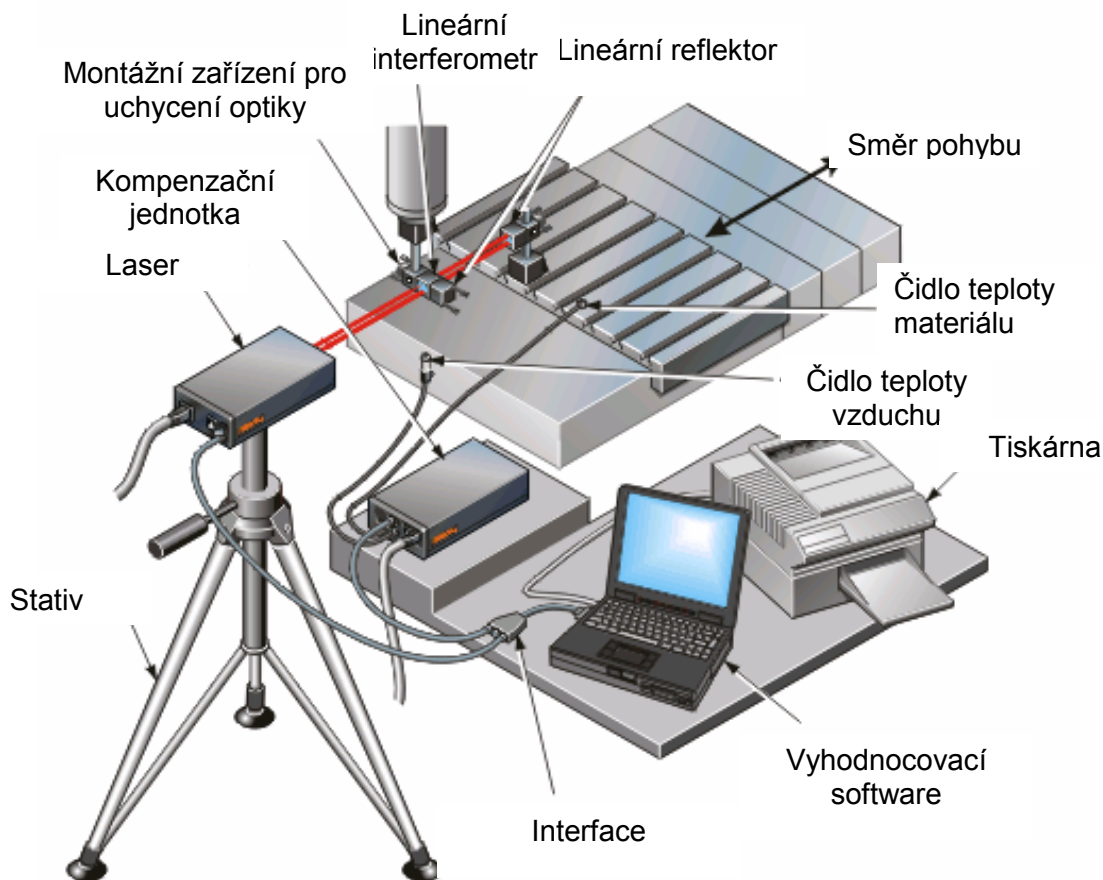
### 3.4 Možnosti využití laserového interferometru

Laserový systém je možné využít pro měření přesnosti polohování, měření odchylek geometrie (úhlové odchylky, přímočarost, rovinnost, kolmost i rovnoběžnost), kompenzaci lineárních chyb, pro pravidelnou recalibraci a opravy. Měření lze provádět s libovolným krokem a není omezené velikostí přístroje. Mezi nejpoužívanější druhy měření za pomoci laserového systému Renishaw ML10 patří lineární měření, respektive přesnost polohování lineárních os.

*Druhy měření pomocí laserového systému ML10:*

Symbol	Definice	Technické zařízení
	- Přesnost polohování lineárních os	
	- Přímost vedení a příčné vůle	
	- Přímočarost pojezdů	
	Rovinnost	
	Kolmost	
	Přesnost polohování rotačních os	
	Rychlost, zrychlení pohyblivých dílců	

### 3.4.1 Lineární měření pomocí laserového interferometru



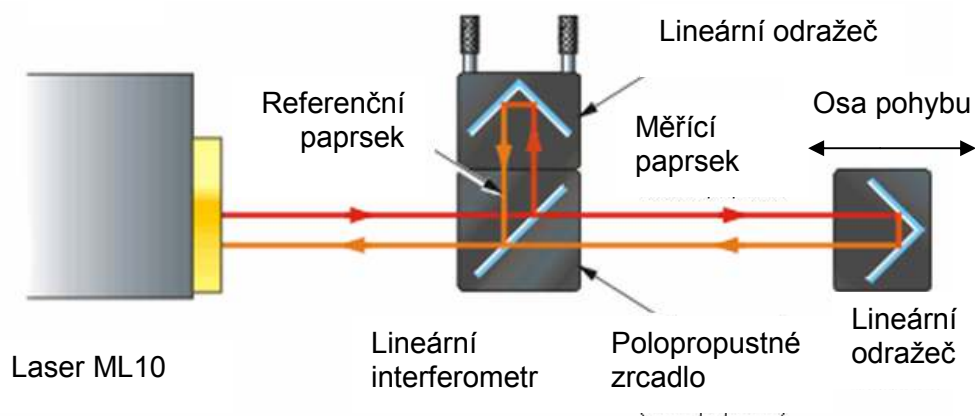
Obr. 11 Sestavení laserového interferometru pro lineární měření

Sestavení laserového interferometru pro lineární měření (obr. 8) obsahuje stojan pro uchycení laseru. Kompenzační jednotku, která kompenzuje vliv okolního prostředí. Lineární interferometr a reflektor sloužící pro usměrňování paprsku. Rozhraní pro propojení počítače s laserovým systémem. Nejběžnější přístroje kalibrované laserovým systémem ML10:

- souřadnicové stroje
- CNC A NC obráběcí stroje
- mikroskopy
- stroje pro řezání vodním paprskem
- klasické stroje
- laserové řezací stroje

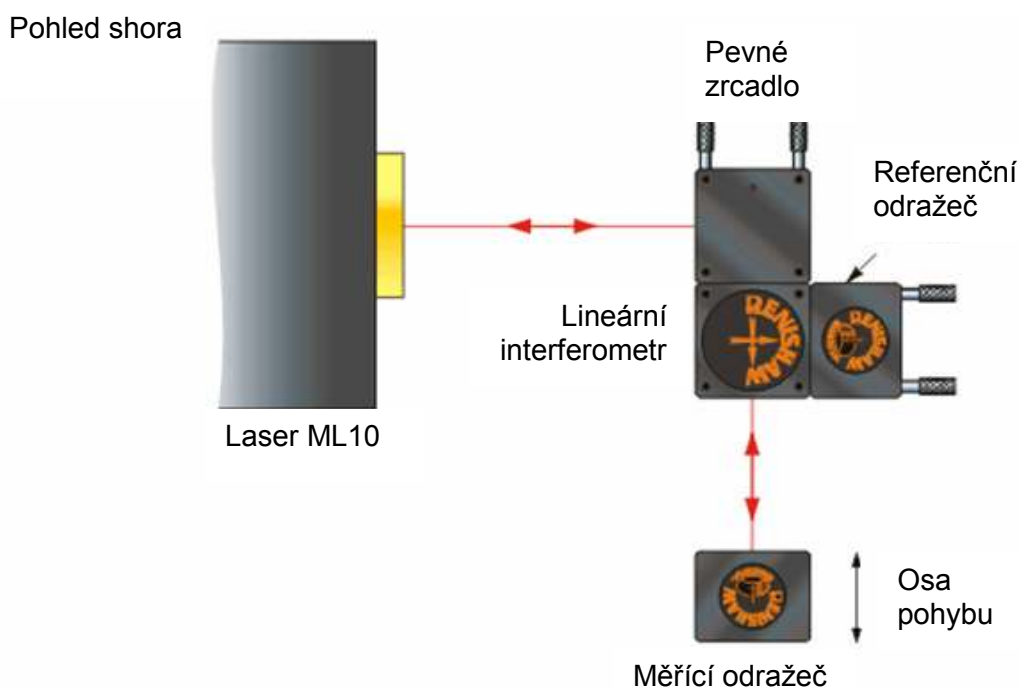
*Možnosti lineárního měření:*

a) Laserová hlava je umístěna ve směru osy měření



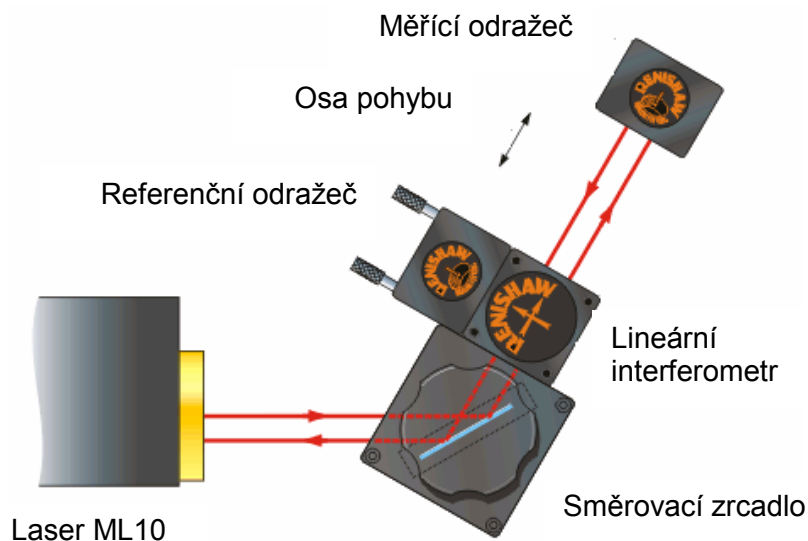
*Obr. 12 Laserová hlava v ose měření*

b) Laserová hlava je natočena v pravém úhlu vzhledem k ose měření



*Obr. 13 Laserová hlava v pravém úhlu k ose měření*

c) Laserová hlava je natočena v obecném úhlu vzhledem k ose měření

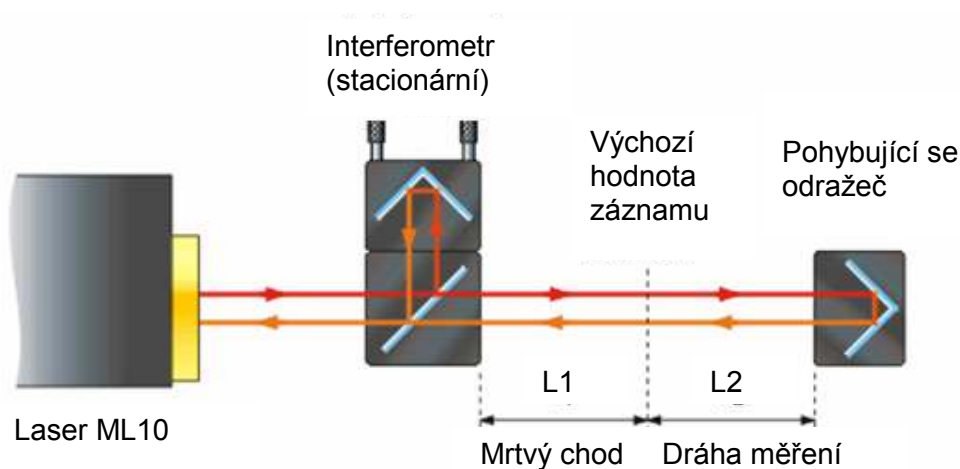


Obr. 14 Laserová hlava v obecném úhlu vzhledem k ose měření

### 3.5 Faktory ovlivňující lineární měření

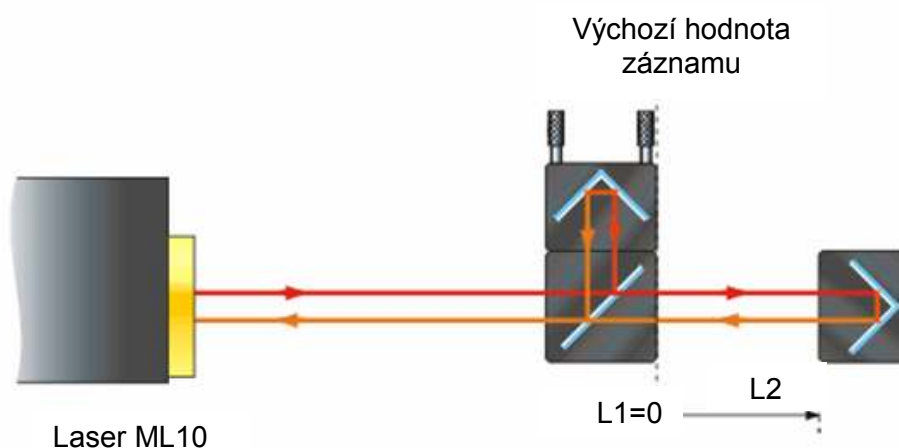
#### 3.5.1 Mrtvý chod

Je chyba, která souvisí se změnou okolních podmínek během lineárního měření, přičemž jednotka EC10 automaticky kompenzuje vliv těchto podmínek. Při standardních podmínkách měření je chyba způsobená mrtvým chodem bezvýznamná. Chyba nastane pokud se okolní prostředí začne během měření měnit. Mrtvý chod vzniká mezi laserovým interferometrem a pohyblivým koutovým odražečem (obr. 15).



Obr. 15 Mrtvý chod při lineárním měření

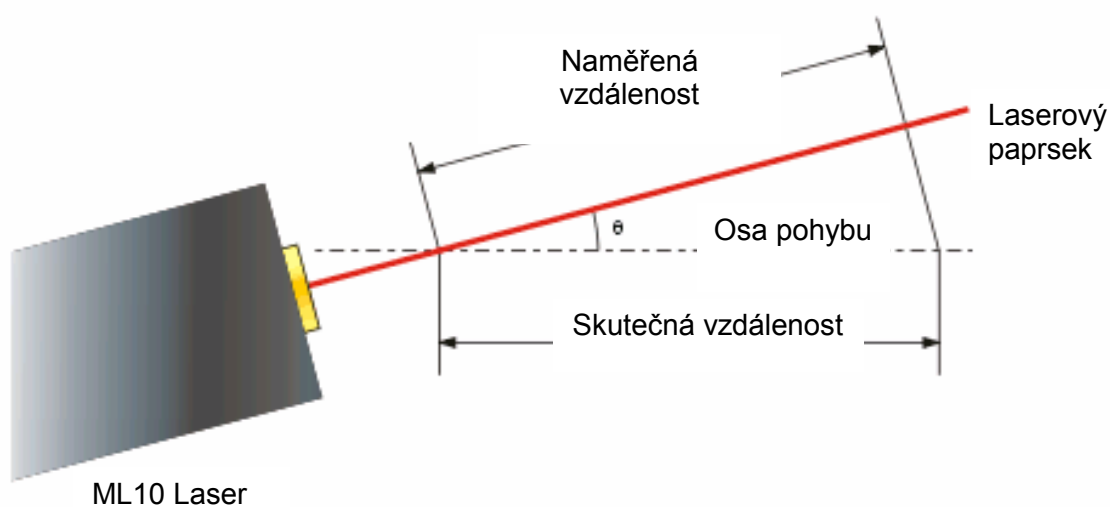
Pokud oba dva prvky nemůžeme z technických důvodů přisunout k sobě, vzniká mezi nimi k mrtvé dráze  $L1$ . Tato dráha, na rozdíl od dráhy  $L2$  není kompenzována jednotkou EC10 a proto zde může dojít k chybě měření, vinou nezkompenzování vlnové délky laseru. Pokud je mrtvá dráha do 1mm, považuje se za zanedbatelnou (obr. 16).



Obr. 16 Správné nastavení optiky pro minimální chybu mrtvé dráhy

### 3.5.2 Kosinová chyba

Vzniká pokud laserový paprsek neseřídíme při lineárním měření přesně. Pak dochází k tomu, že naměřená vzdálenost je větší než skutečná (obr. 17). To z důvodu, že osa měření není totožná s osou laserového paprsku.

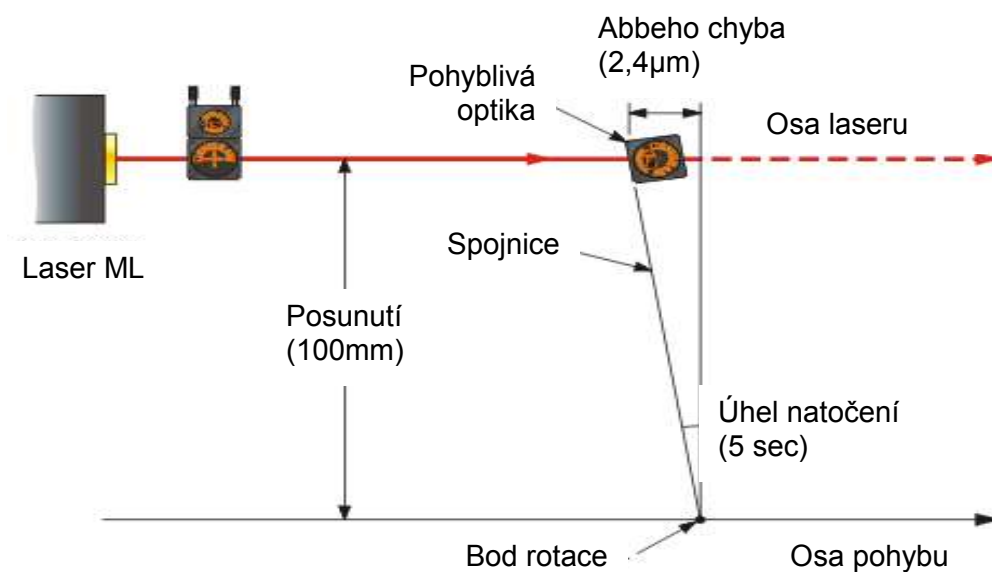


Obr. 17 Kosinová chyba



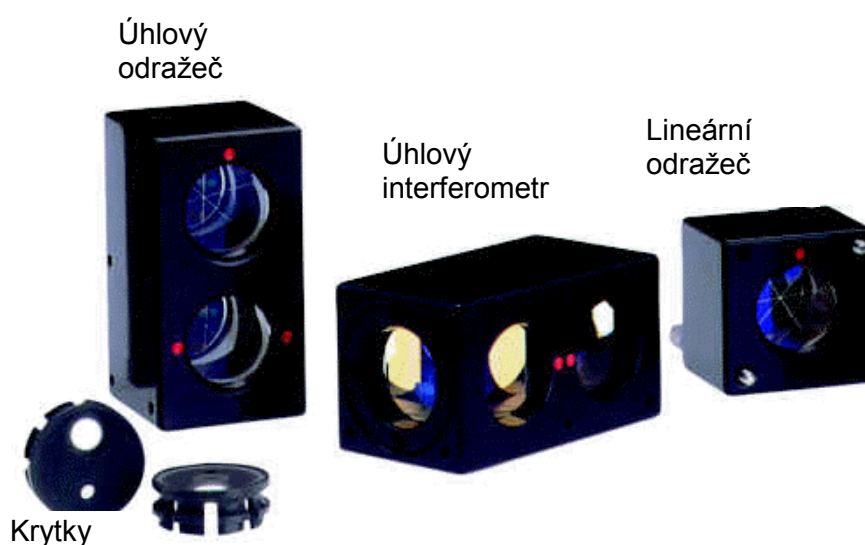
### 3.5.3 Abbeho chyba

Pokud by měření probíhalo paprskem sice seřazeným rovnoběžně, ale posunutým vzhledem k definované osy kalibrace, potom by každé natočení pohyblivé optiky zapříčinilo chybu způsobenou Abbeho aberací. Pro zmenšení vlivu této chyby by laserový měřicí paprsek měl být totožný s linií, podle které je kalibrace prováděna. Pro každou úhlovou sekundu natočení je uvedená chyba přibližně  $0,005 \mu\text{m/mm}$  posunu.



Obr. 18 Znáznornění Abbeho chyby

### 3.6 Prvky pro lineární měření



Obr. 19 Prvky používané pro lineární laserové měření

*Úhlový odražeč* – je složen ze zrcadel s velmi vysokou odrazivostí světla. Lze jej použít jak pro lineární, tak i úhlové měření.

*Úhlový interferometr* – je složen z polopropustného skla, které dokáže paprsek rozdělit na dva shodné paprsky.

*Lineární odražeč* – má shodnou funkci jako úhlový odražeč. Nelze jej použít pro úhlová měření.

*Krytky* – jsou vyrobené z plastu s vyznačenými terčíky. Slouží jako pomocná součást při seřizování laserového paprsku.

## 4 POPIS NOREM ČSN ISO 230

### 4.1 Norma ČSN ISO 230 – 2

Tato část normy specifikuje metody zkoušek a vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslicově řízených strojů přímým měřením v jednotlivých osách. Následující definice v rozsahu kapitol 4.1.1 až 4.1.23 jsou citované z normy.

**4.1.1 Rozsah dráhy v ose** – největší dráha lineární nebo úhlová, v jejímž rozsahu se může pohyblivá část pomocí číslicového řízení přestavovat.

**4.1.2 Měřený rozsah dráhy** – část rozsahu dráhy, která je použita pro měření. Je zvolena tak, aby jak do první, tak do poslední zadané polohy bylo možné najetí z obou stran.

**4.1.3 Zadaná poloha**  $P_i$  ( $i = 1$  až  $m$ ) - poloha, do které je programován pohyb nastavované části. Index „i“ udává jednu určitou polohu ze všech zadaných poloh v dané ose.

**4.1.4 Skutečná poloha**  $P_{ij}$  ( $i = 1$  až  $m$ ;  $j = 1$  až  $n$ ) - měřená poloha dosažená nastavovanou částí při j-tém nastavení do i-té zadané polohy.

**4.1.5 Úchylka polohy; polohová úchylka**  $x_{ij}$  – rozdíl mezi skutečnou polohou, dosaženou nastavovanou částí a zadanou polohou.

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (1)$$

**4.1.6 Jednostranný** (unidirectional) – výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává vždy ve stejném smyslu pohybu. Symbol  $\uparrow$  značí, že se jedná o parametr odvozený z měření při nastavování polohy v kladném smyslu. Symbol  $\downarrow$  se vztahuje k sérii měření, prováděných při nastavování polohy v záporném smyslu, například  $x_{ij}\uparrow$  nebo  $x_{ij}\downarrow$ .

**4.1.7 Dvoustranný** (bidirectional) – výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává v obou smyslech pohybu.

**4.1.8 Rozšířená nejistota** – veličina určující interval výsledků měření, o kterém lze předpokládat, že bude zahrnovat velkou část rozložení hodnot.

**4.1.9 Koeficient rozšíření** – číselný koeficient používaný jako násobitel standardní nejistoty pro zjištění rozšířené nejistoty.

**4.1.10 Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze**  $\overline{x_i}\uparrow$  nebo  $\overline{x_i}\downarrow$  - aritmetický průměr polohových úchylek, zjištěných při sérii „n“ najetí do polohy  $P_i$  v jednom smyslu.

$$\overline{x_i}\uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{i,j}\uparrow \quad (2)$$

a

$$\overline{x_i}\downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{i,j}\downarrow \quad (3)$$

**4.1.11 Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze**  $\overline{x_i}$  - aritmetický průměr průměrných jednostranných polohových úchylek,  $\overline{x_i}\uparrow$  a  $\overline{x_i}\downarrow$ , zjištěných při najíždění do polohy  $P_i$  v obou smyslech.

$$\overline{x_i} = \frac{\overline{x_i}\uparrow + \overline{x_i}\downarrow}{2} \quad (4)$$

**4.1.12 Necitlivost v poloze**  $B_i$  – rozdíl mezi průměrnými jednostrannými polohovými úchylkami, zjištěnými při najíždění do polohy  $P_i$  v obou smyslech.

$$B_i = \overline{x_i}\uparrow - \overline{x_i}\downarrow \quad (5)$$

**4.1.13 Necitlivost v ose B** – největší z absolutních hodnot necitlivosti  $|B_i|$  ze všech zadaných poloh v dané ose.

$$B_i = \max. [|B_i|] \quad (6)$$

**4.1.14 Průměrná necitlivost v ose B** – aritmetický průměr necitlivostí  $B_i$  ze všech zadaných poloh v dané ose.

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (7)$$

**4.1.15 Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v poloze  $s_i \uparrow$  nebo  $s_i \downarrow$**  - odhad standardní nejistoty polohových úchylek zjištěných při sérii „n“ najetí do polohy  $P_i$  v jednom smyslu.

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (8)$$

a

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (9)$$

**4.1.16 Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze  $R_i \uparrow$  nebo  $R_i \downarrow$**  - rozsah odvozený z rozšířené nejistoty jednostranných polohových úchylek v poloze při použití koeficientu rozšíření 2.

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (10)$$

a

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (11)$$

**4.1.17 Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy poloze  $R_i$**

$$R_i = \text{největší z hodnot } [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (12)$$

**4.1.18 Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose  $R \uparrow$  nebo  $R \downarrow$  a dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R** – největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze  $P_i$  v dané ose.

$$R_{\uparrow} = \max [R_{i\uparrow}] \quad (13)$$

$$R_{\downarrow} = \max [R_{i\downarrow}] \quad (14)$$

$$R = \max [R_i] \quad (15)$$

**4.1.19 Jednostranná systematická polohová úchylka v ose  $E_{\uparrow}$  nebo  $E_{\downarrow}$**  - rozdíl mezi největší a nejmenší aritmetickou hodnotou průměrných jednostranných polohových úchylek při nastavování polohy v jednom smyslu  $\overline{x_i}_{\uparrow}$  nebo  $\overline{x_i}_{\downarrow}$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze v dané ose.

$$E_{\uparrow} = \max[\overline{x_i}_{\uparrow}] - \min[\overline{x_i}_{\uparrow}] \quad (16)$$

a

$$E_{\downarrow} = \max[\overline{x_i}_{\downarrow}] - \min[\overline{x_i}_{\downarrow}] \quad (17)$$

**4.1.20 Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose  $E$**  – rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednostranných polohových úchylek při nastavování polohy v obou smyslech  $\overline{x_i}_{\uparrow}$  a  $\overline{x_i}_{\downarrow}$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze dané ose.

$$E = \max[\overline{x_i}_{\uparrow}; \overline{x_i}_{\downarrow}] - \min[\overline{x_i}_{\uparrow}; \overline{x_i}_{\downarrow}] \quad (18)$$

**4.1.21 Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose  $M$**  – rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotu průměrných dvoustranných polohových úchylek  $\overline{x_i}$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze  $P_i$  v dané ose.

$$M = \max[\overline{x_i}] - \min[\overline{x_i}] \quad (19)$$

**4.1.22 Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose  $A_{\uparrow}$  nebo  $A_{\downarrow}$**  - rozsah odvozený ze spojení jednostranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty při jednostranném nastavování polohy při použití koeficientu rozšíření 2.

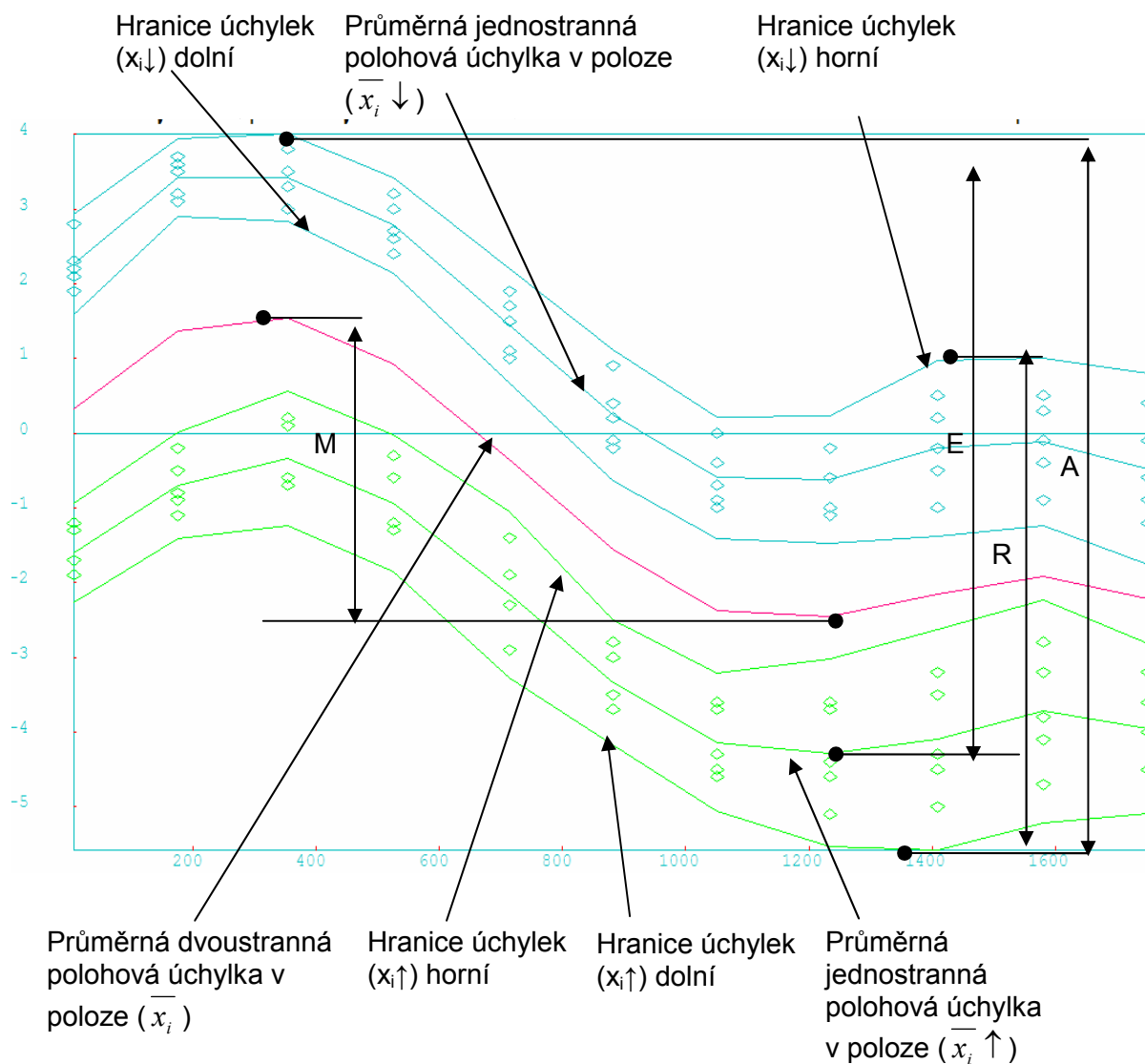
$$A_{\uparrow} = \max[\overline{x_i}_{\uparrow} + 2s_{i\uparrow}] - \min[\overline{x_i}_{\uparrow} - 2s_{i\uparrow}] \quad (20)$$

a

$$A_{\downarrow} = \max[\overline{x_i}_{\downarrow} + 2s_{i\downarrow}] - \min[\overline{x_i}_{\downarrow} - 2s_{i\downarrow}] \quad (21)$$

**4.1.23 Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A** – rozsah odvozený ze spojení dvoustranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty při dvoustranném nastavování polohy při použití koeficientu rozšíření 2.

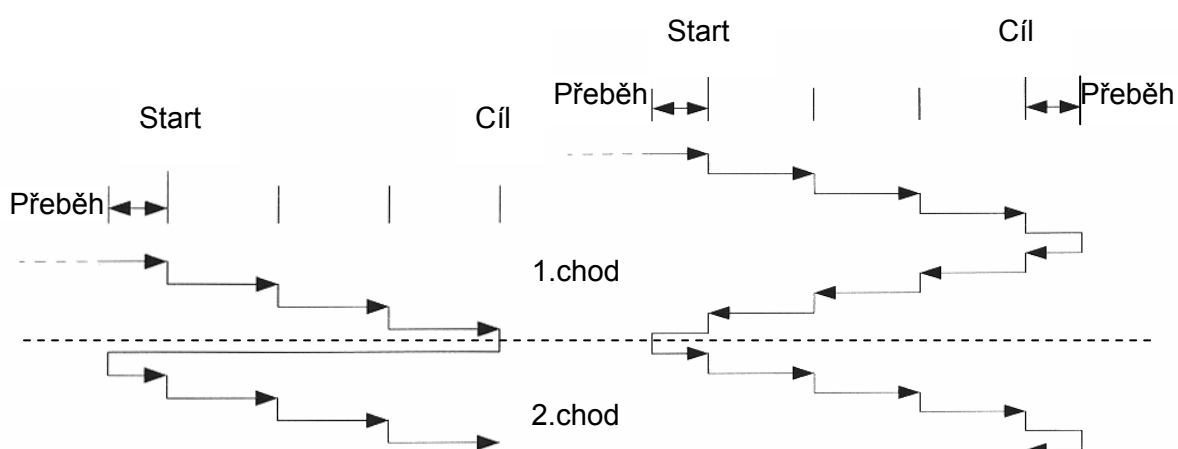
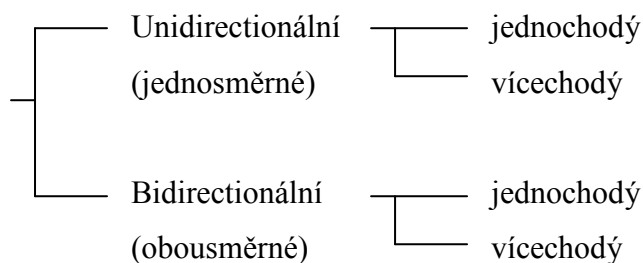
$$A = \max [\bar{x}_i \uparrow + 2s_{i\uparrow} ; \bar{x}_i \downarrow + 2s_{i\downarrow}] - \min [\bar{x}_i \uparrow - 2s_{i\uparrow} ; \bar{x}_i \downarrow - 2s_{i\downarrow}] \quad (22)$$



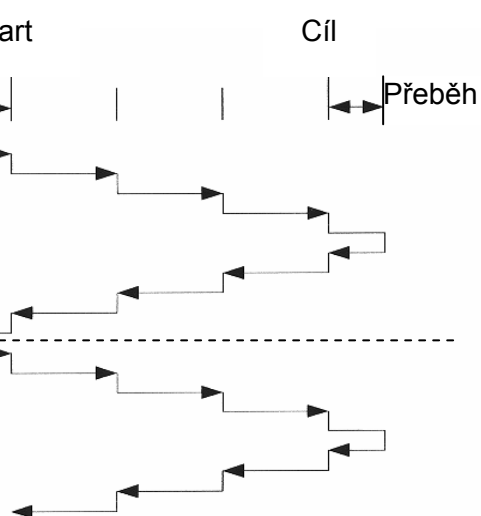
Obr. 20 Grafické znázornění vybraných definic ČSN ISO 230-2

## 5 TYPY MĚŘÍCÍCH CYKLŮ

### 5.1 Lineární měřicí cykly

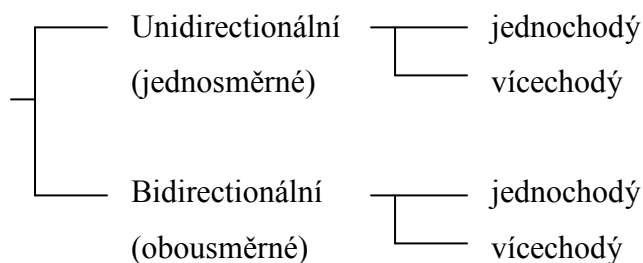


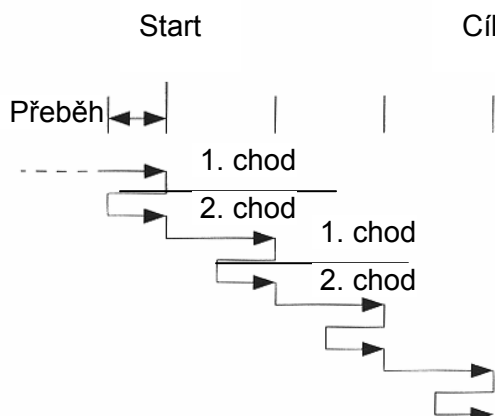
Obr. 21 Lineární dvojchodý unidirectionální cyklus



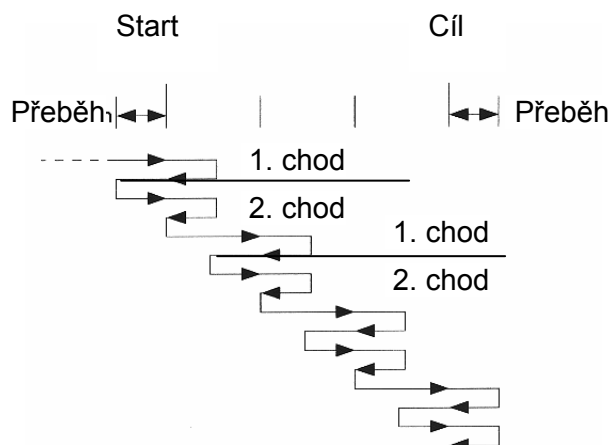
Obr. 22 Lineární dvojchodý bidirectionální cyklus

### 5.2 Pendulární měřicí cykly





Obr. 23 Pendulární dvojchodý  
unidirekcionální cyklus



Obr. 24 Pendulární dvojchodý  
bidirekcionální cyklus

## 6 UNIVERSÁLNÍ DÍLENSKÝ MIKROSKOP PK3

Měřicí mikroskop PK3 byl vyroben v roce 1955 v SSSR. Přístroj je stavebnicového typu se širokým rozsahem použití. Podstatné přednosti stavebnicového systému jsou ve schopnosti demontáže měřicích prvků a nahrazením jinými měřicími prvky pro dané specifické měření. PK3 může být použit pro měření délek (v pravoúhlých i polárních souřadnicích), úhlů, závitů, porovnávání tvaru závitů. Může být použit i jako prohlížecký mikroskop pro zkoumání opracovaných kovových povrchů, minerálů atd.

Měření lze provádět prosvětlením, nebo horním osvětlením resp. kombinovaně. Při prosvěcování je zkoušený obrobek ve světelném toku telecentrického osvětlovacího zařízení. Jeho obrysy jsou zobrazovány objektivem do meziobrazové roviny mikroskopu. Zde je destička s ryskami umístěná v okuláru. Je opatřena buďto příhodnou značkou k pozorování měřeného bodu zkoušeného kusu, nebo také u více se opakujících profilů, např. závitů, se rysky porovnávají se stínovým obrazem zkoušeného kusu. Při osvětlení shora je světlo odráženo zrcadlem, které je opatřeno částečně propustnou vrstvou na zkušební kus. Obraz je pak pozorován mikroskopem. Přitom je možné volit jasné, nebo tlumené osvětlení.

Tabulka č.3 Technické specifikace mikroskopu PK3

Rozlišitelnost	posuv mikrometrického šroubu	0,001	[mm]
	úhel v okuláru pro měření úhlů	1'	[°]
	úhel v revolverovém okuláru	10'	[°]
	úhel na kruhovém stole	6'	[°]



Rozsah měření	mikrometrický šroub v ose x	0 až 20	[mm]
	posuv v ose x	0 až 70	[mm]
	mikrometrický šroub v ose y	0 až 20	[mm]
	posuv v ose y	0 až 50	[mm]
	úhel v okuláru pro měření úhlů	0 až 360	[°]
	úhel na kruhovém stolu	0 až 180	[°]
Hmotnost		400	[kg]

## 7 MONITOROVACÍ SYSTÉM COMET MS4+

Je určen pro záznam průběhů ze snímačů nejrůznějších veličin, signalizaci alarmových stavů, případně pro řízení dalších procesů. Vlastnosti vstupů jsou dány osazenými vstupními moduly. Ústředna se snímači osazená dle objednávky může měřit analogové veličiny, frekvenci, počítat impulsy, vyhodnocovat dvoustavové veličiny a načítat údaje ze zařízení pracujících s protokolem Advantech. Při požadavku na změnu vstupních signálů lze vstupní moduly vyměnit za jiné typy. Vstupní signály se připojují pomocí odnímatelné svorkovnice umístěné na horní stěně skříně. Zpracování záznamu se provádí po přenosu zaznamenaných dat do osobního počítače pomocí dodaného programu [4].

*Hlavní funkce měřicího systému MS4+ :*

- Přijímat informace z ústředny pomocí SMS zpráv - aktuální hodnoty, alarmy, zaplnění paměti a další.
- Individuálně konfigurovat každý vstupní kanál pro měření, vyhodnocení alarmů a záznam dat, včetně individuálního intervalu záznamu pro každý vstup.
- Každý vstupní kanál může být nezávisle nastaven pro různé typy záznamu (nepřetržitý záznam, časově omezený záznam, atd.)
- Pro každý vstupní kanál lze definovat až 4 různé logické podmínky, na základě jejichž platnosti se aktivuje záznam a alarmy.
- Na základě alarmových stavů spínat vybraná relé

## 8 VLASTNÍ REALIZACE MĚŘENÍ

Následující části obsahují moji vlastní práci, tématicky rozdělenou do jednotlivých kapitol. Snažil jsem se o vyličení postupu měření co nejsrozumitelnější formou, doplněnou o dostatečné množství obrázků, které jsem pořídil přímo při měření fotoaparátem Canon A560. Některé detaily jsou bohužel hůře viditelné, avšak v době, kdy došlo k pořízení fotografií, jsem nebyl pevně rozhodnutý, na které detaily snímaných objektů se zaměřit. Pro názornost jsem některé z detailů vykreslil ručně.

Poloha se měří na přesném mikrometrickém šroubu mikroskopu PK3 v jeho maximálním rozsahu 20 mm. Mikroskop byl v minulé době přesunut z jednoho místa na druhé v téže laboratorní učebně, a proto budou výsledky měření důležité v tom, abychom poznali, zda při přesunu nedošlo k poškození měřicí části mikroskopu. Poté bude provedena repase mikroskopu na základě provedeného měření. (Zde se ověří, zda má cenu investovat do mikroskopu. Pokud by byl poškozený při přesunu, investice by byla výrazně vyšší a možná by se od ní upustilo.) Na konci se provede další měření, abychom zjistili zda repase proběhla v pořádku, výsledky obou měření (před repasí a po ní) zhodnotíme. Vše bude vysvětleno přesně dle mého postupu a dle instrukcí, které jsem dostal od svého vedoucího práce doc. Ing. Vladimíra Paty, Dr.. Postup, jak záhy uvidíte, je zcela korektní a naměřené výsledky zcela validní. Měření jsem rozdělil do 4 kapitol, z nichž má každá své podkapitoly. V prvních dvou kapitolách je měřena poloha v ose X a Y před provedenou repasí mikroskopu. V druhé části je měřena tatáž poloha v ose X a Y, s tím rozdílem, že je již mikroskop po repasi.

### 8.1 Postup při měření polohy pro osu X před repasí

V první fázi měření je třeba rozložit a zajistit stojan laseru. Stojan (obr. 25) jako takový, se skládá z mnoha pohyblivých částí, které slouží k usměrnění a seřízení paprsku laseru. Nejprve musíme stojan uvést do vodorovné polohy. To se provede na základě tří podpěrných noh a malé vodováhy S0, která je integrována v těle stojanu. Aretačními šrouby S1 a prostředním S2 zajistíme pečlivě nohy, protože jinak by mohlo dojít k zhroucení a pádu laseru na podlahu. Pomocí aretačního šroubu odjistíme vertikální posun, který umožňuje najetí laseru do přibližně stejné roviny jako je rovina optiky. To vše pomocí kolečka S3. Vše znovu zajistíme a můžeme přistoupit k nasazení laseru na stojan.

*Obr. 25 Stojan laseru**Obr. 26 Seřizovací šrouby*

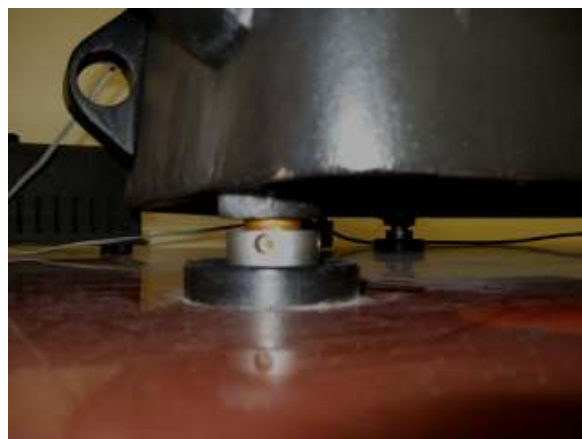
Laser položíme na stojan tak, že se stojanu dotýká ve třech bodech rozmístěných ve tvaru trojúhelníku. Dva body se nachází v přední části stojanu a jeden vzadu u přívodu elektrické energie. Nyní musíme vycentrovat seřizovací šrouby (obr. 26) umístěné hned pod laserem. To děláme z důvodu, aby nedošlo při pozdějším seřizování laserového paprsku k posunu seřizovacího šroubu až do krajní polohy. V tomto případě bychom museli celý stojan přesunout a tím bychom byli nuceni stojan znovu vyrovnávat. Seřizovací šrouby jsou 4, tudíž máme velký prostor pro korigování. Po uchycení laseru je zapotřebí jeho vyrovnaní do vodorovné polohy pomocí seřizovacích šroubů a vodováhy (obr. 27), kterou na něj položíme.

*Obr. 27 Vodováha při seřizování do roviny*

Přistoupíme k samotnému mikroskopu PK3. Ten musíme také uvést do vodorovné polohy. Na obrázcích č. 28 a č. 29 je vidět integrovaná vodováha a korekční otočný kroužek, pomocí něhož můžeme celý mikroskop vyrovnat. Přitom musíme dbát na to, abychom se nedotýkali funkčních částí. To můžeme pouze v ochranných pomůckách (rukavice) z důvodu možné koroze způsobené lidským potem. Dovoleno je dotýkat se částí nefunkčních, tedy chemicky ošetřených.

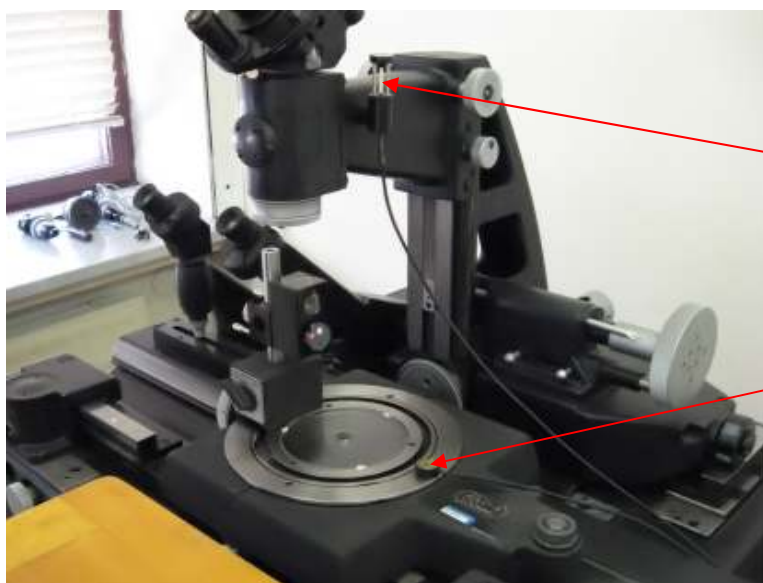


*Obr. 28 Integrovaná vodováha*



*Obr. 29 Otočný korekční kroužek*

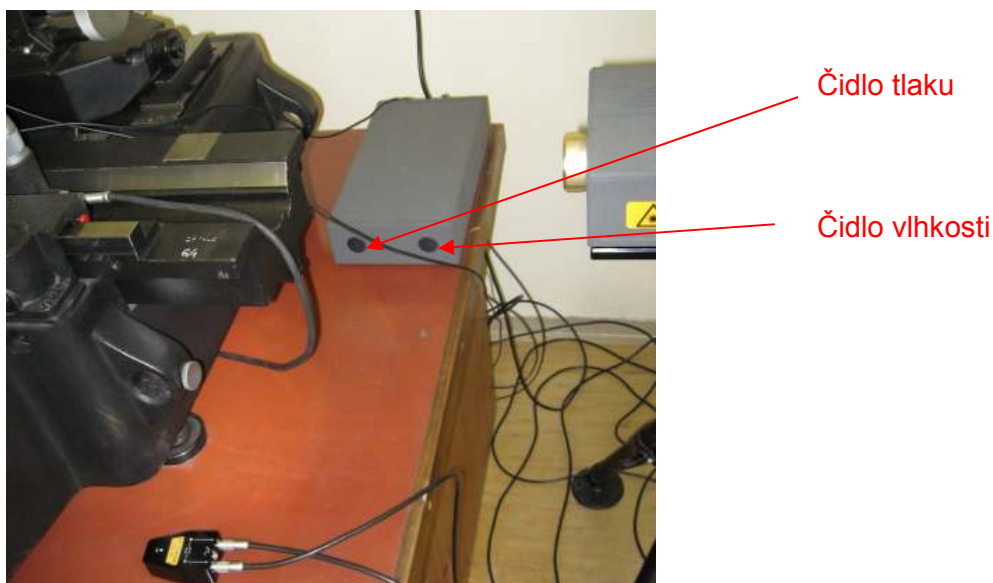
Pokud máme vše v rovině, můžeme začít připojovat další periferie. Jako první připojíme kompenzační jednotku a její dvě teplotní čidla pro vzduch a měřený materiál. Samotnou jednotku položíme co nejbližší k laserovému paprsku z důvodu možné změny vlhkosti. Tlaková změna v tomto případě není na vzdálenosti od paprsku závislá. Teplotní čidla rozmístíme podle obrázku č. 30.



Čidlo teploty  
vzduchu

Čidlo teploty  
materiálu

*Obr. 30 Rozmístění teplotních čidel*



Obr. 31 Čidla na kompenzační Jednotce

Propojíme kompenzační jednotku a laser společně do USB Interface DX10 (obr. 32). V tomto kroku nezáleží na tom, do jaké z krajních zdírek je zapojíme. Je třeba dát pozor pouze na to, aby červená tečka na USB Interface byla stejně orientovaná jako na konektorech kabelů, které vedou od komponentů. Po slyšitelném cvaknutí víme, že došlo k správnému zapojení. USB kabel připojíme k počítači.



Obr. 32 USB Interface DX10

Po připojení spustíme kompenzační jednotku a laser. Nejprve by se tedy měly zapínat periferie. USB Interface se rozbliká (je to dáno transferem dat tam i zpět.). Laserová jednotka se začne zahřívat na provozní teplotu (dochází k ustálení laserového paprsku ohřevem trubice na provozní teplotu, tzv. Temperaci). Doba ohřevu laserové jednotky je přibližně 15 minut. Indikace znázorňující, zda je laser připraven, se provádí pomocí LED diody zabudované v čele laseru. Ta může mít tři možné stavy:

- **Blikající červené světlo** – laser je temperován, není připraven k použití
- **Blikající oranžové světlo** – laser je připravován k použití, paprsek je téměř stabilizovaný
- **Zelené světlo** – laser je připraven

Diodová indikace je jedna možnost ze dvou, jakým způsobem zjistit stav laseru. Další možností je počítač připojený přes USB Interface.

Poslední nezávislou periferií je monitorovací systém MS4+ (obr. 33) od firmy Comet, která umožní monitorovat teplotu po celou dobu měření. Teplotní čidlo (obr. 34) je připojeno k ústředně pomocí COM portu a je umístěno co nejbližší k laserovému paprsku. Na konci měření se tato jednotka přepojí k počítači a údaje se uloží do formátu XLS programu Microsoft Excel.



Obr. 33 Monitorovací systém MS4+



Obr. 34 Teplotní čidlo Comet

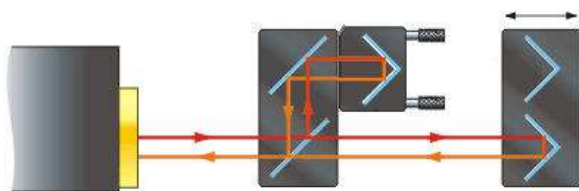
V další části sestavíme optiku pro měření polohy mikroskopu. Ta se bude skládat z několika částí a to:

- 2x upevňovací magnetické držáky
- 2x spojovací prvky mezi držákem a optikou
- 1x optika složená ze dvou koutových odražečů
- 1x optika složená z jednoho koutového odražeče
- 1x optika složená ze dvou interferometrických děličů

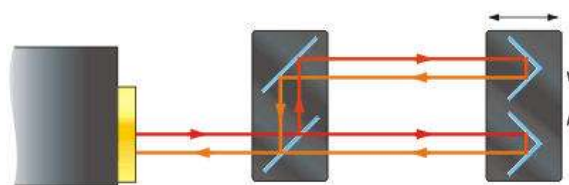


- 1x krytka pro seřizování paprsku

V tomto případě se tedy jedná o optiku, která je využívána zejména pro měření úhlů (obr. 36). Tudíž se musíme v této chvíli spokojit s optikou, kterou lze, při malé úpravě (obr. 35) použít právě pro měření polohy. Na obrázcích je jasně vidět, o jakou úpravu se jedná.



Obr. 35 Optika pro lineární měření

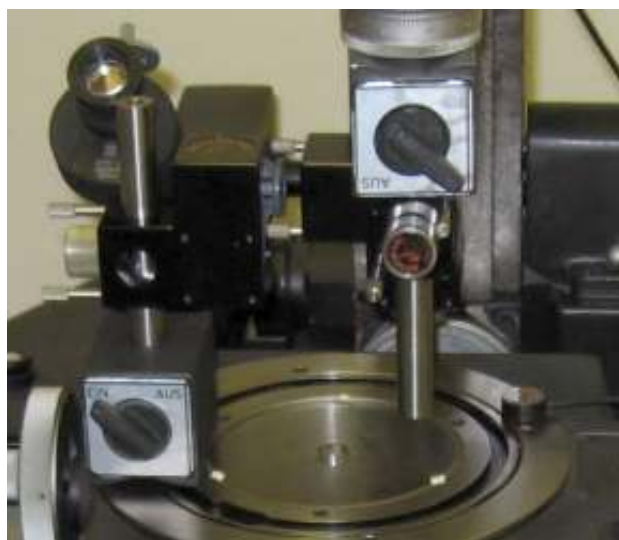


Obr. 36 Optika pro měření úhlů

Po úspěšném dokončení všech předchozích bodů můžeme přistoupit k samotné montáži. Nejprve je nutné odstranit kus měřicí hlavy mikroskopu a dva držáčky, protože překáží při montáži magnetického držáku optiky (obr. 37). Po odmontování přiděláme magnetický držák na místo odmontované hlavy tak, že jej přitiskneme a tlačítko přepneme do polohy EIN. To samé provedeme na místě, kde jsme odmontovali dva držáčky. Na tyče, které vedou z magnetických držáků nasuneme a poskládáme optické komponenty podle obrázku č. 35 (resp. podle obrázku č. 38).



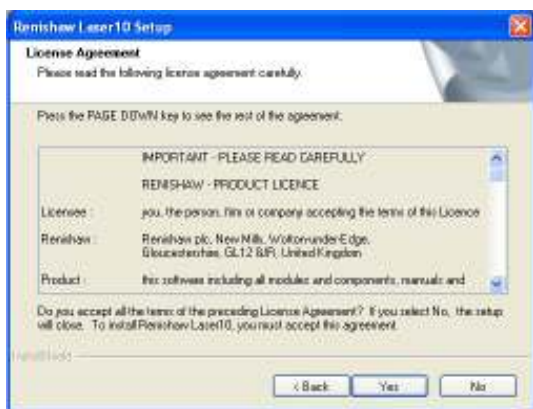
Obr. 37 Pohled na PK3



Obr. 38 Reálné sestavení optiky

Nyní je třeba, abychom nainstalovali software firmy Renishaw. Ten je dodáváný společně s laserem na datovém nosiči CD. Instalace je celá v angličtině, ale velice jednoduchá. Vložíme CD do mechaniky, po chvíli se zobrazí okno, stiskneme tlačítko *Next*.

Poté musíme souhlasit s licenčním ujednáním (obr. 39), zvolíme adresář (obr. 40), kam se má instalovat software. Poté klikneme na *Next* ještě jednou v dalším okně a instalace softwaru se spustí. Pak na výzvu počítač restartujeme a software je připraven k použití.



Obr. 39 Licenční ujednání



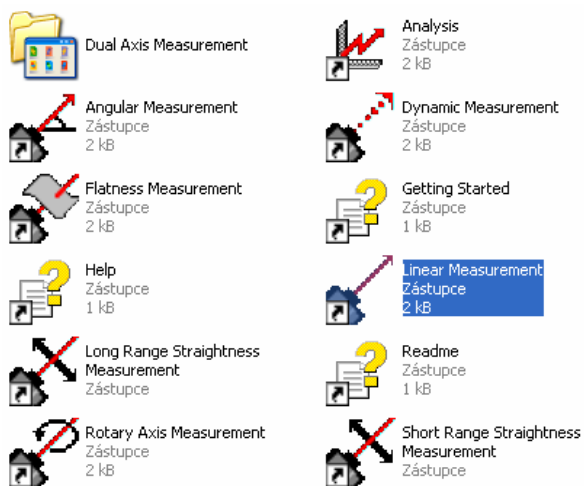
Obr. 40 Volba adresáře

### 8.1.1 Seřízení laserové paprsku v ose X

Po restartu PC spustíme program Renishaw z hlavní nabídky Windows, která je schována pod tlačítkem *Start* (obr. 41). Z nabídky, která se nám zobrazí vybereme ikonu *Linear Measurement* (obr. 42).



Obr. 41 Tlačítko Start



Obr. 42 Ikona Linear Measurement

Nejvíce nás v tuto chvíli zajímá síla signálu, která je znázorněna v levém okraji (obr. 43) zobrazených položek. Na tomto obrázku je zřetelné, že se jedná o již seřízený laserový paprsek, jelikož hodnota signálu se rovná 100%.

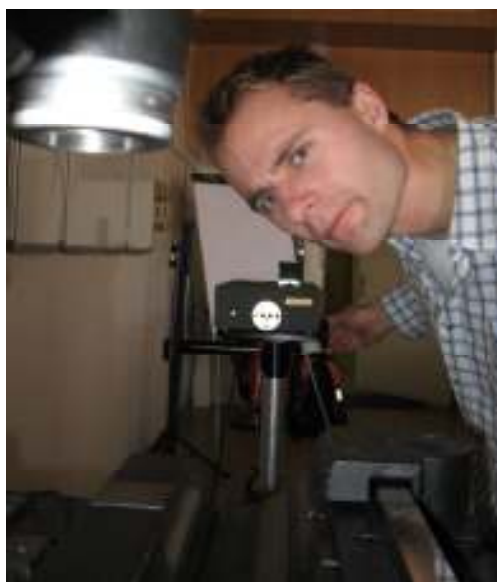




Obr. 43 Zobrazení síly signálu laseru

Abychom docílili takové hodnoty signálu, je potřeba určitá manuální zručnost, cit a hlavně zkušenosti. Z počátku mi seřizování dělalo problémy, ale s přibývajícím praxí je možné i tyto problémy odstranit. Zaprvé je nutné nastavit si na laserové hlavě seřizovací paprsek, jehož průměr je 3 mm. Tento paprsek se snažíme nahrubo nasměřovat na koutový odražeč, přitom na čas odmontujeme interferometrický dělič a položíme jej na ocelovou desku.

Interferometrický dělič zajistíme, aby nám nepřekážel při seřizování. Poté vezmeme plastovou krytku otočenou bílým terčíkem vzhůru a opatrně ji připevníme na spodní koutový odražeč. Pokud se nyní zadíváme na bílou krytku, zjistíme, že paprsek, který dopadá na tuto krytku, je mimo bílý terčík. Pokud ovšem paprsek nevidíme, je třeba vzít bílý papír a vložením před koutový odražeč zjistit, kde se paprsek nachází. Podle toho můžeme případně doladit celý stojan i s laserem. Naším úkolem je dostat paprsek do bílého terčíku (obr. 45). K tomuto úkonu nám slouží korigující šrouby na stojanu laseru.



Obr. 44 Seřizování paprsku

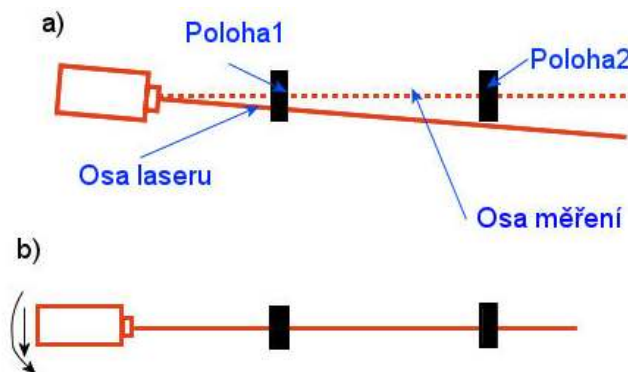
Nejprve pojezd mikroskopu přesuneme do krajní polohy. Poté se pokusíme pomocí šroubů laserový paprsek usměrnit (obr. 44). Po úspěšném absolvování této jednodušší fáze můžeme pokračovat. Pojezdem nyní přejedeme do druhé krajní polohy. Přitom sledujeme paprsek na terčíku. Zkorigujeme paprsek i v této druhé krajní poloze. V žádném případě se v tuto chvíli nesmí začít příliš zbrkle otáčet korigujícími šrouby. Druhou krajní polohu nesmíme korigovat způsobem jako u první krajní polohy. U korigování v druhé krajní poloze je třeba každé pootočení šroubu kompenzovat pootočením

jiného šroubu v opačném směru. Pokud by se tento postup nedodržel, došlo by k tomu, že by se při opětovném přesunu optiky do první krajní polohy paprsek s bílým terčíkem nesešel.

Musíme paprsek dostat do osy měření (obr. 46). Na obrázku č. 46b je znázorněn směr korekce laseru. Laser posuneme směrem dolů a korekci dokončíme natočením laseru v protisměru hodinových ručiček. Znázornění platí pro vertikální i horizontální korekci.



Obr. 45 Laserový paprsek mimo terčík



Obr. 46 Princip seřizování

V případě, že se nám podaří seříditi druhou krajní pozici, přejedeme do první pozice a dokorigujeme případné chyby. Tento postup budeme opakovat do té doby, než se paprsek při přejezdu mezi krajními polohami téměř nepohne. Poté přepneme laser na měřicí paprsek a ujistíme se, zda máme dostatečný signál v obou polohách. V dalším kroku připojíme interferometrický dělič. Dáváme si přitom pozor, abychom se nedotkli koutového odražeče. Přepneme seřizovací paprsek na 6 mm a sledujeme na terčíku laserové hlavy, jak se nám měřicí (od odražeče) a referenční (od interferometru) paprsek sbíhají dohromady. To vše korigujeme manuálně nastavováním interferometrického děliče. Po skončení seřizování přepneme laserovou hlavu zpět na měřicí paprsek a na počítači zjistíme stav signálu. Vyzkoušíme signál opět ve všech krajních polohách a pokud je alespoň nad horní červenou čarou (viz. obr. 43), můžeme začít s měřením.

Na místa optiky, které jsou nefunkční, jsme z bezpečnostních důvodů připnuli plastové krytky, aby nedošlo k poškození těchto částí.

Před započatím měření polohy najedeme posuvem co nejblíže k interferometrickému děliči, mikrometrický šroub mikroskopu vytočíme do jeho krajní polohy (obr. 48), nastavíme

výchozí hodnotu na celé číslo a seřídíme si optický hledáček (obr. 47). Nyní jsme připraveni k měření.



Obr. 47 Pohled do okuláru

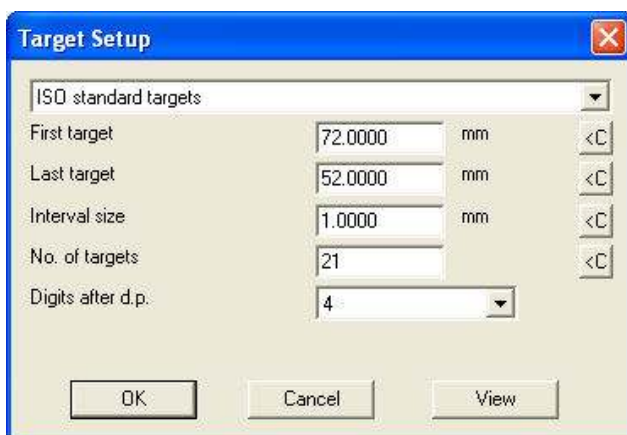


Obr. 48 Mikrometrický šroub v krajní poloze

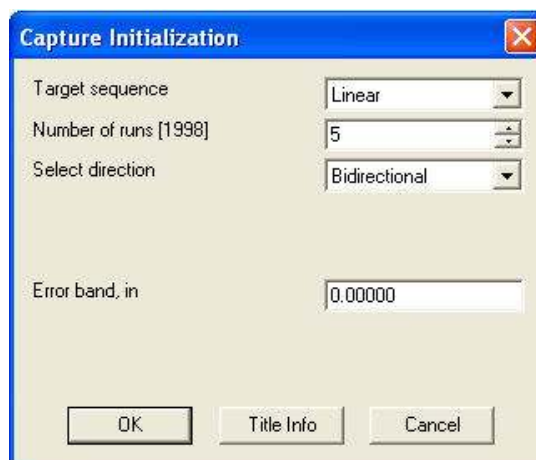
### 8.1.2 Měření polohy v ose X před repasí

V programu Renishaw klikneme na tlačítko **Automatic setup**, a vyplníme údaje (obr. 49). Jednotlivé položky znamenají:

- First target = počáteční hodnota měření
- Last target = poslední hodnota měření
- Interval size = rozpětí mezi jednotlivými hodnotami při měření
- No. of target = počet měřicích poloh
- Digits after d.p. = počet desetinných míst naměřených výsledků



Obr. 49



Obr. 50

Po stisku tlačítka **OK** vyplníme další položky (obr. 50). Jedná se o:

- Target sequence = typ měřicího cyklu
- Numer of runs = počet chodů
- Select direction = typ měřicího směru

V další části necháme vše tak, jak je nastaveno. Změníme jen Overrun step size na 1mm. Potom vše potvrdíme a ujistíme se, že máme v okuláru mikroskopu nastavenou hodnotu 72mm. V hlavním menu programu stiskneme tlačítko **Apply present**. Pomocí tohoto příkazu se hodnoty vynulují a můžeme začít s měřením polohy. Ujistíme se, že máme označenou hodnotu 72 mm, první chod, záporný směr (obr. 51). Pak klikneme na tlačítko **Capture**. Data se uloží a my přejedeme na hodnotu 71, 70, atd.. U hodnoty 52, záporný směr, uděláme přeběh na hodnotu 51, poté se vrátíme zpět na hodnotu 52, kladný směr. Tento postup opakujeme u hodnoty 72.

1(-)	72.000000	No data
1(-)	71.000000	No data
1(-)	70.000000	No data
1(-)	69.000000	No data
1(-)	68.000000	No data
1(-)	67.000000	No data
1(-)	66.000000	No data
1(-)	65.000000	No data
1(-)	64.000000	No data
1(-)	63.000000	No data

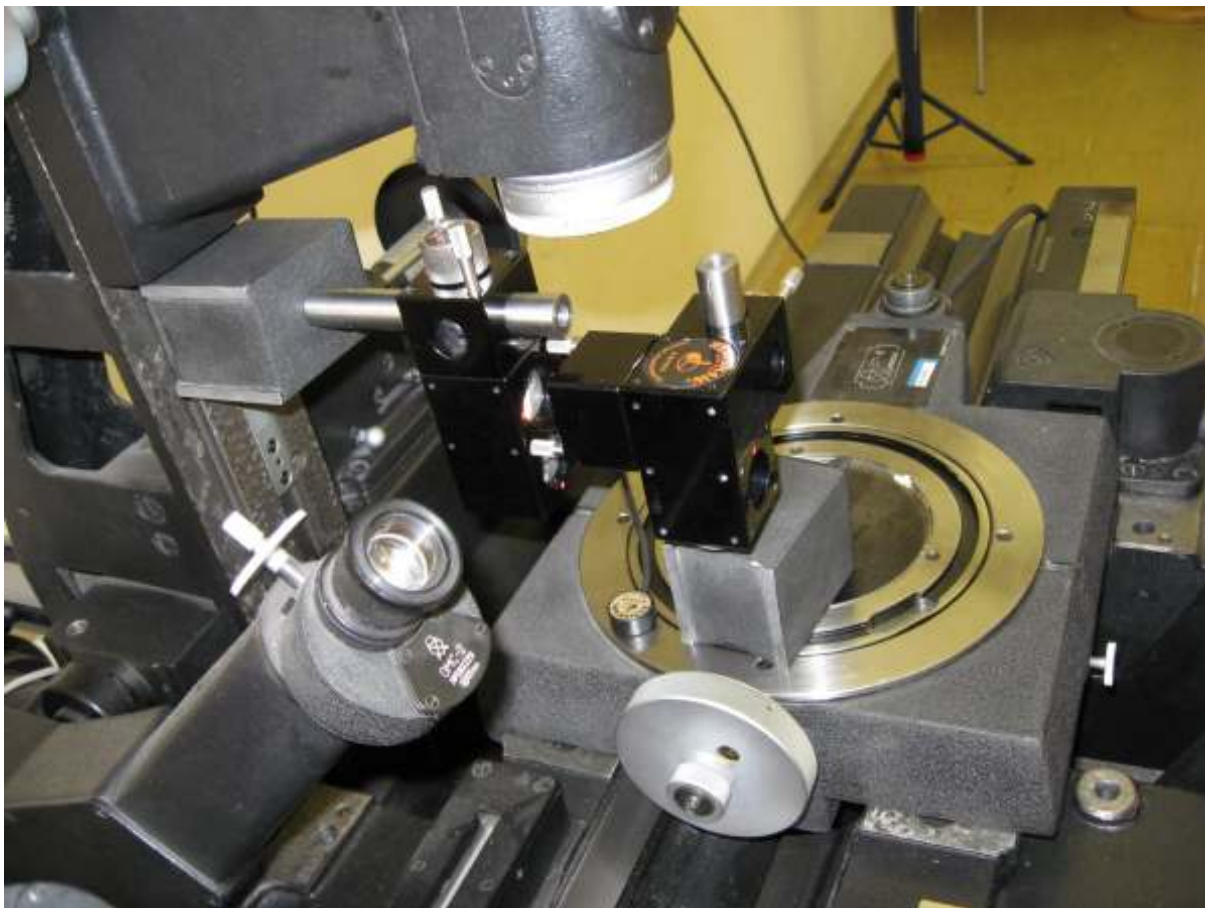
Obr. 51 Zachycování jednotlivých poloh

Pokud se stane, že přeběhneme některou z hodnot, musíme se vrátit zpět na předchozí hodnotu. Velkou nevýhodou tohoto přístroje je jeho samotná optika, jelikož je čtení údajů po delší době pro oči velmi namáhavé.

## 8.2 Postup při měření polohy pro osu Y před repasí

Tento postup se téměř neliší od postupu pro osu X. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl tuto kapitolu zkrátit. Začneme uspořádáním optické soustavy. Zde jsme použili opět optiku využívanou zejména pro měření úhlů. Uspořádání soustavy můžeme vidět na obrázku č. 52. Pro seřízení laseru a připevnění čidel kompenzátoru platí ty samé podmínky jako u osy X.

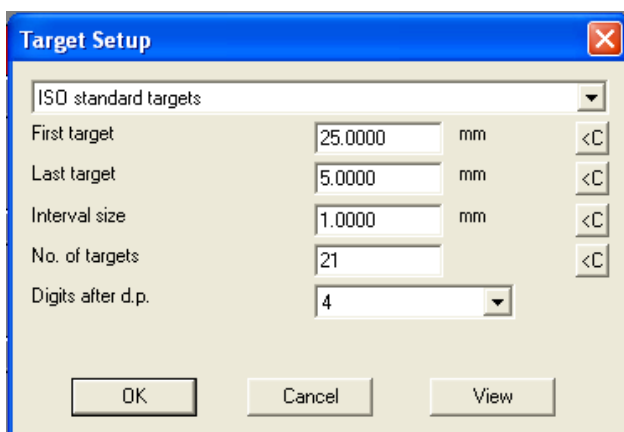




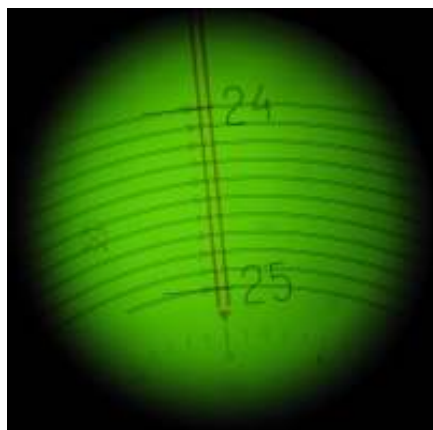
*Obr. 52 Uspořádání optiky při měření osy Y před repasí*

### 8.2.1 Měření polohy v ose Y před repasí

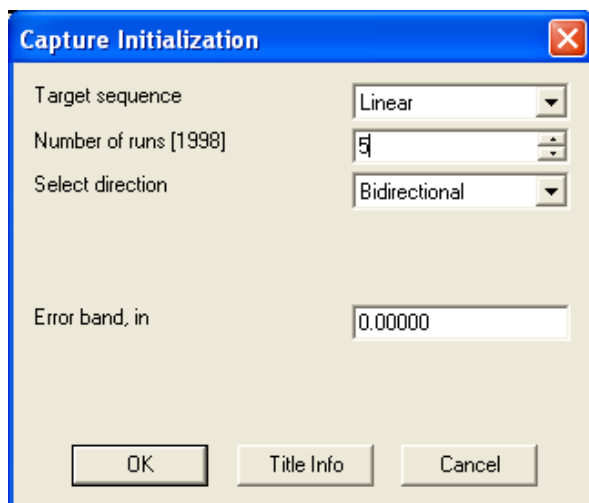
Po sestavení optiky můžeme přejít rovnou k nastavení programu Renishaw (obr. 53 až obr. 56).



*Obr. 53 Nastavení poloh*



*Obr. 54 Pohled do okuláru*



Obr. 55

1(-)	25.000000	No data
1(-)	24.000000	No data
1(-)	23.000000	No data
1(-)	22.000000	No data
1(-)	21.000000	No data
1(-)	20.000000	No data
1(-)	19.000000	No data
1(-)	18.000000	No data
1(-)	17.000000	No data
1(-)	16.000000	No data

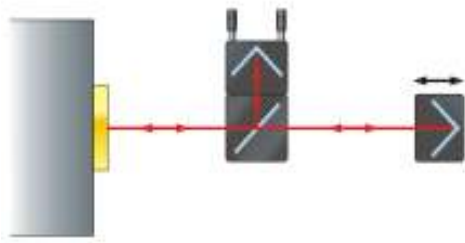
Obr. 56

V okně nastavíme overruns step na 1mm, zbytek zachováme. Poté měříme a zachycujeme hodnoty (obr. 56) jako u předchozího měření.

### 8.3 Postup při měření polohy pro osu X po repasi

V této době již byla k dispozici optika pro lineární měření, proto ji teď popíši (obr. 57). Je složena z:

- 2x upevňovací magnetické držáky
- 2x spojovací prvky mezi držákem a optikou
- 2x optika složená z jednoho koutového odražeče
- 1x optika složená z jednoho interferometrického děliče
- 1x krytka pro seřizování paprsku



Obr. 57 Schéma lineární měřicí optiky

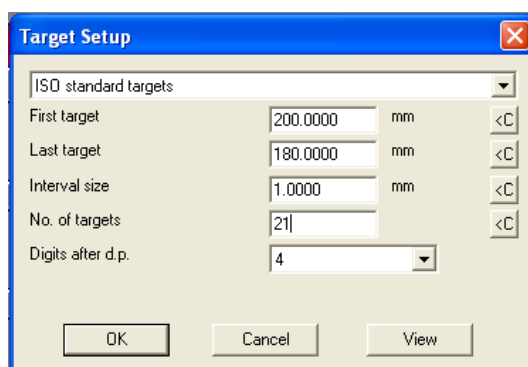


Obr. 58 Reálné uspořádání měřicí optiky

Optiku sestavíme (obr. 58). Jak si ovšem můžeme povšimnout, oproti měření před repasí jsme tentokrát oddělali kovovou desku, která nám překážela při montáži. Samotný držák jsme připnuli na její místo. Následně se zmenšila mrtvá dráha a to z toho důvodu, že dříve bránily přiblížení pohyblivého odražeče k interferometrickému děliči šroubky.

### 8.3.2 Měření polohy v ose X po repasi

Nastavení programu Renishaw (obr. 59). Pokud není uvedeno jinak, nastavení se shoduje s předchozími měřeními.



Obr. 59

### 8.4 Postup při měření polohy pro osu Y po repasi

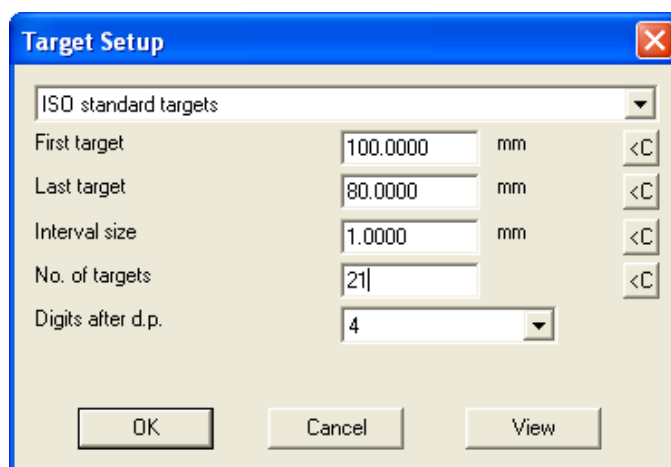
Toto měření jsem provedl já a Aleš Prokop. Hodnoty jsme ukládali do počítače.



Obr. 60 Sestavení optiky pro měření osy Y po repasi

### 8.4.1 Měření polohy v ose Y po repasi

Nastavení programu Renishaw (obr. 61):



Obr. 61

## 9 VÝSLEDKY KALIBRACE

Naměřené hodnoty poloh jsou v přílohách, následující část obsahuje vyhodnocené výsledky měření.




### 9.1 Převod naměřených dat

Jelikož naměřená data jsou uložena ve formátu RTL, lze s nimi pracovat pouze v programu od firmy Renishaw. V tomto programu je úprava dat omezená, proto je nejvýhodnější převést si tyto data do aplikace Excel. I přesto, že program Word data ve formátu RTL nepodporuje, není problémem v něm tato data bezchybně otevřít. Zde uvedená data měření označíme postupně po sloupcích a následně je zkopírujeme do Excelu. Při tomto druhu označování je nutné držet klávesu ALT, abychom mohli označit pouze jeden sloupec. Takto zkopírovaná data mají vlastnosti textu. My však potřebujeme, aby tato data měla vlastnosti odpovídající vlastnostem čísel. Proto je třeba k převedení zaměnit oddělovače desetinného místa z tečky na čárku. To se provede pomocí kombinace kláves CTRL + F. Myši přepneme na záložku **Nahradit**. Do kolonky **Najít** napíšeme tečku a do **Nahradit** napíšeme čárku. Klepneme na tlačítko **Nahradit vše** a tím se nám z naměřených dat stanou čísla.



**Poznámka:** Pokud před měřením zapomeneme provést nulování, pak musíme od všech naměřených hodnot odečíst první naměřenou hodnotu. Tu odečteme i od ní samotné. Pak bude výchozí hodnota nula a od ní se budou odvíjet adekvátně naměřené hodnoty. V programu Excel je to pomocí vzorců snadné, nesmíme však zapomenout, že čísla jsou propojeny se vzorci, proto je dobré převést tyto výsledky na čísla bez vzorců.

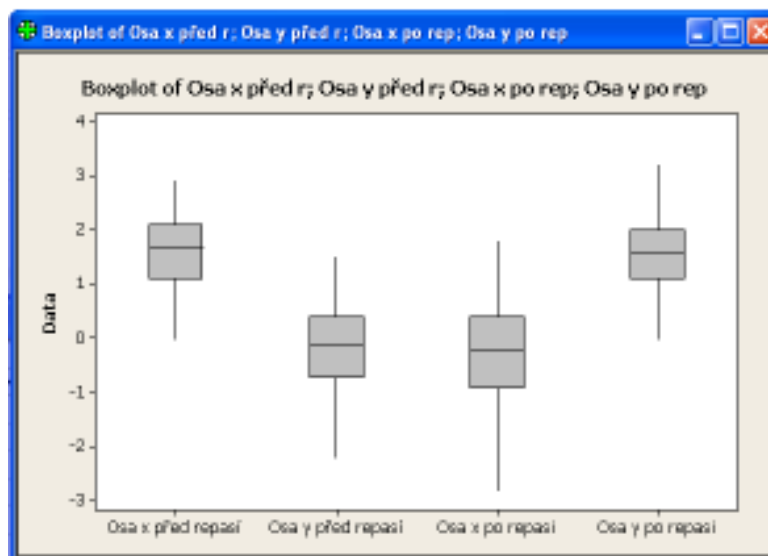
Postup:

- Klepněte na tlačítko **Kopírovat** .
- Na panelu nástrojů (Panel nástrojů: Panel s tlačítky a jinými ovládacími prvky, pomocí nichž lze provádět příkazy. Chcete-li zobrazit určitý panel nástrojů, stiskněte klávesu ALT a potom kombinaci kláves SHIFT+F10.) Standardně klepněte na tlačítko **Vložit** .
- Klepněte na šipku vedle tlačítka Možnosti vložení  a potom klepněte na příkaz **Pouze hodnoty**.

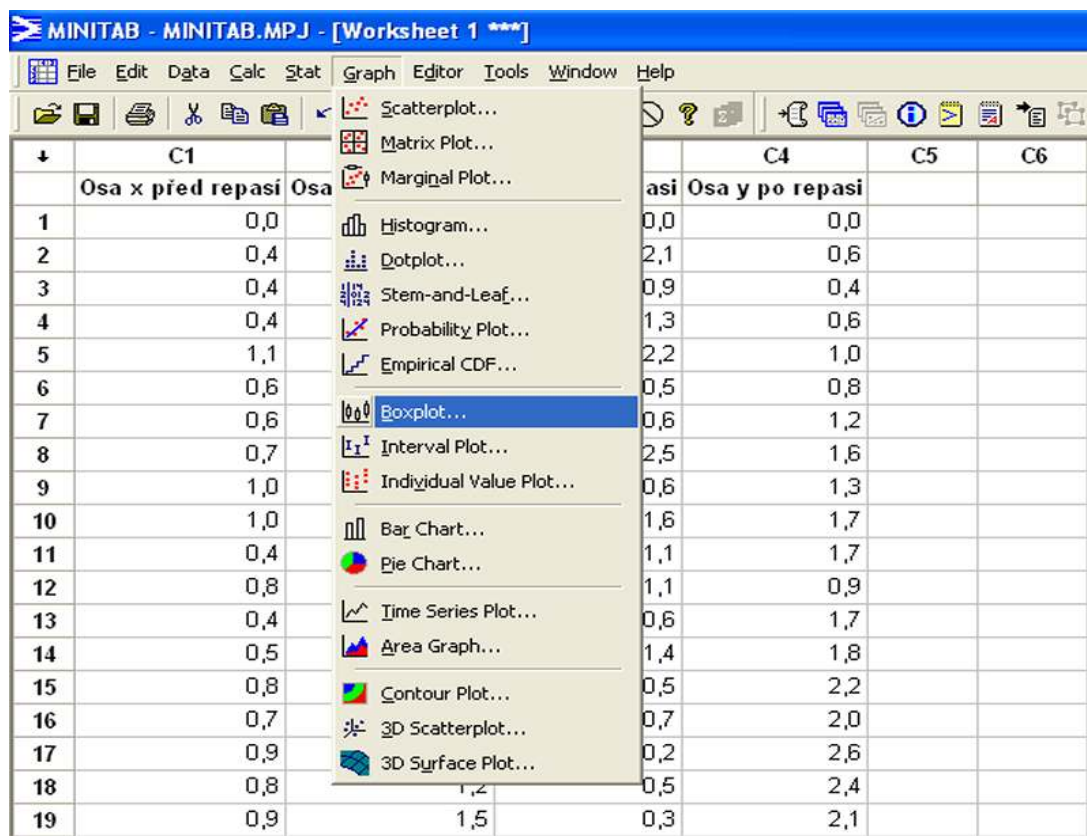
## 9.2 Testování naměřených hodnot na hrubou chybu

Testování provádíme pomocí programu Minitab následujícím postupem:

- Označíme si jednotlivé sloupce a zkopírujeme naměřená data z excelu
- Klikneme na **Graph, Boxplot**, (obr. 63) zvolíme **Multiple Y's Simple**.
- Označíme pomocí klávesy **Shift** všechny sloupce a stiskneme tlačítko **Select** a potvrdíme **OK**.



Obr. 62 Grafické znázornění datového souboru



Obr. 63 Minitab

Výsledné vyjádření datového souboru pomocí krabicového grafu je vidět na obrázku č. 62. Vyznačené obdélníky obsahují přibližně 1/2 všech hodnot datového souboru tak, že nahoru a dolů od obdélníků leží vždy cca 1/4 hodnot datového souboru. Dolní (horní) strana obdélníku odpovídá tzv. dolnímu (hornímu) kvartilu. Čára uvnitř obdélníků ukazuje medián. Případná hvězdička \* označuje podezřelé, případně extrémně odchýlené hodnoty. To se v našem případě neprokázalo.

### 9.3 Postup při výpočtu výsledků kalibrace

Následující výpočty jsou ilustrativní a jsou provedeny pro osu X před repasí. Zdrojová data jsou získána z přílohy č.1.

#### *Necitlivost v ose B:*

$$B = \max [B_i] = \max \left[ \begin{array}{l} 0,219; 0,047; 0,148; 0,125; 0,039; 0,234; 0,078; 0,219; 0,078; 0,000; 0,172; \\ 0,039; 0,164; 0,203; -0,102; 0,047; 0,086; -0,141; 0,094; -0,211; -0,172 \end{array} \right] = \underline{\underline{0,234 \mu m}}$$

**Průměrná necitlivost v ose  $\bar{B}$ :**

$$\begin{aligned}\bar{B} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i = \\ &= \frac{1}{21} \left( 0,219 + 0,047 + 0,148 + 0,125 + 0,039 + 0,234 + 0,078 + \right. \\ &\quad \left. + 0,219 + 0,078 + 0,000 + 0,172 + 0,039 + 0,164 + 0,203 + \right. \\ &\quad \left. - 0,102 + 0,047 + 0,086 - 0,141 + 0,094 - 0,211 - 0,172 \right) = \underline{\underline{0,065 \mu m}}\end{aligned}$$

**Jednostranná přesnost nastavení polohy o ose  $A \uparrow, A \downarrow$ :**

$$\begin{aligned}A \uparrow &= \max \left[ \bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow \right] - \min \left[ \bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow \right] = \max \begin{bmatrix} 3,583; 3,103; 3,472; 2,783; 3,033; 3,239; \\ 2,728; 3,081; 2,515; 2,792; 2,623; 2,733; \\ 2,715; 2,898; 2,810; 2,804; 3,387; 3,565; \\ 3,280; 2,932; 2,508 \end{bmatrix} - \\ &- \min \begin{bmatrix} 0,057; 0,097; -0,032; -0,023; 0,447; 0,081; 0,352; \\ 0,519; 0,605; 0,408; 0,457; 0,627; 0,605; 0,422; \\ 0,270; 0,196; 0,213; -0,165; -0,680; -0,172; 0,732 \end{bmatrix} = 3,583 - (-0,680) = \underline{\underline{4,263 \mu m}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A \downarrow &= \max \left[ \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow \right] - \min \left[ \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow \right] = \max \begin{bmatrix} 3,464; 3,005; 2,764; 3,189; 3,106; 2,621; \\ 2,987; 2,710; 3,018; 2,832; 2,792; 2,714; \\ 2,943; 3,279; 2,811; 3,217; 2,881; 2,972; \\ 3,191; 3,526; 3,407 \end{bmatrix} - \\ &- \min \begin{bmatrix} -0,664; -0,325; -0,444; -0,029; 0,414; -0,101; -0,067; \\ 0,170; 0,142; 0,528; -0,072; 0,406; -0,143; -0,079; \\ 0,469; 0,183; 0,439; 0,068; 0,049; 0,074; 0,593 \end{bmatrix} = 3,526 - (-0,664) = \underline{\underline{4,190 \mu m}}\end{aligned}$$

**Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose  $A$ :**

$$A = \max \left[ \bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow \right] - \min \left[ \bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= \max \begin{bmatrix} 3,583; 3,103; 3,472; 2,783; 3,033; \\ 3,239; 2,728; 3,081; 2,515; 2,792; \\ 2,623; 2,733; 2,715; 2,898; 2,810; \\ 2,804; 3,387; 3,565; 3,280; 2,932; \\ 2,5083,464; 3,005; 2,764; 3,189; \\ 3,106; 2,621; 2,987; 2,710; 3,018; \\ 2,832; 2,792; 2,714; 2,943; 3,279; \\ 2,811; 3,217; 2,881; 2,972; 3,191; \\ 3,526; 3,407 \end{bmatrix} - \min \begin{bmatrix} 0,057; 0,097; -0,032; -0,023; 0,447; \\ 0,081; 0,352; 0,519; 0,605; 0,408; \\ 0,457; 0,627; 0,605; 0,422; 0,270; \\ 0,196; 0,213; -0,165; -0,680; -0,172; \\ 0,732; -0,664; -0,325; -0,444; -0,029; \\ 0,414; -0,101; -0,067; 0,170; 0,142; \\ 0,528; -0,072; 0,406; -0,143; -0,079; \\ 0,469; 0,183; 0,439; 0,068; 0,049; \\ 0,074; 0,593 \end{bmatrix} = \\
&= 3,583 - (-0,680) = \underline{\underline{4,263 \mu m}}
\end{aligned}$$

**Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M:**

$$\begin{aligned}
M &= \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] = \max \begin{bmatrix} 1,510; 1,360; 1,230; 1,640; 1,780; 1,380; 1,500; \\ 1,550; 1,620; 1,680; 1,450; 1,580; 1,480; 1,700; \\ 1,590; 1,680; 1,700; 1,450; 1,670; 1,700; 1,910 \end{bmatrix} - \\
&- \min \begin{bmatrix} 1,510; 1,360; 1,230; 1,640; 1,780; 1,380; 1,500; \\ 1,550; 1,620; 1,680; 1,450; 1,580; 1,480; 1,700; \\ 1,590; 1,680; 1,700; 1,450; 1,670; 1,700; 1,910 \end{bmatrix} = 1,910 - 1,230 = \underline{\underline{0,680 \mu m}}
\end{aligned}$$

**Jednostranná systematická polohová úchylka v ose  $E \uparrow$ ,  $E \downarrow$ :**

$$\begin{aligned}
E \uparrow &= \max[\bar{x}_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow] = \max \begin{bmatrix} 1,820; 1,600; 1,720; 1,380; 1,740; 1,660; 1,540; \\ 1,800; 1,560; 1,600; 1,540; 1,680; 1,660; 1,660; \\ 1,540; 1,500; 1,800; 1,700; 1,300; 1,380; 1,620 \end{bmatrix} - \\
&- \min \begin{bmatrix} 1,820; 1,600; 1,720; 1,380; 1,740; 1,660; 1,540; \\ 1,800; 1,560; 1,600; 1,540; 1,680; 1,660; 1,660; \\ 1,540; 1,500; 1,800; 1,700; 1,300; 1,380; 1,620 \end{bmatrix} = 1,820 - 1,300 = \underline{\underline{0,520 \mu m}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E \downarrow &= \max[\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] = \max \begin{bmatrix} 1,400; 1,340; 1,160; 1,580; 1,760; 1,260; 1,460; \\ 1,440; 1,580; 1,680; 1,360; 1,560; 1,400; 1,600; \\ 1,640; 1,700; 1,660; 1,520; 1,620; 1,800; 2,000 \end{bmatrix} - \\
&- \min \begin{bmatrix} 1,400; 1,340; 1,160; 1,580; 1,760; 1,260; 1,460; \\ 1,440; 1,580; 1,680; 1,360; 1,560; 1,400; 1,600; \\ 1,640; 1,700; 1,660; 1,520; 1,620; 1,800; 2,000 \end{bmatrix} = 2,000 - 1,160 = \underline{\underline{0,840 \mu m}}
\end{aligned}$$

**Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose:**

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] = \max \left[ \begin{array}{l} 1,400; 1,340; 1,160; 1,580; 1,760; \\ 1,260; 1,460; 1,440; 1,580; 1,680; \\ 1,360; 1,560; 1,400; 1,600; 1,640; \\ 1,700; 1,660; 1,520; 1,620; 1,800; \\ 2,000; 1,820; 1,600; 1,720; 1,380; \\ 1,740; 1,660; 1,540; 1,800; 1,560; \\ 1,600; 1,540; 1,680; 1,660; 1,660; \\ 1,540; 1,500; 1,800; 1,700; 1,300; \\ 1,380; 1,620 \end{array} \right] -$$

$$- \min \left[ \begin{array}{l} 1,400; 1,340; 1,160; 1,580; 1,760; 1,260; 1,460; \\ 1,440; 1,580; 1,680; 1,360; 1,560; 1,400; 1,600; \\ 1,640; 1,700; 1,660; 1,520; 1,620; 1,800; 2,000; \\ 1,820; 1,600; 1,720; 1,380; 1,740; 1,660; 1,540; \\ 1,800; 1,560; 1,600; 1,540; 1,680; 1,660; 1,660; \\ 1,540; 1,500; 1,800; 1,700; 1,300; 1,380; 1,620 \end{array} \right] = 2,000 - 1,160 = \underline{\underline{0,840 \mu m}}$$

**Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose  $R \uparrow$ ,  $R \downarrow$  a dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose  $R$ :**

$$R \uparrow = \max[R_i \uparrow] = \max \left[ \begin{array}{l} 3,526; 3,007; 3,503; 2,806; 2,586; 3,157; 2,377; \\ 2,561; 1,910; 2,383; 2,165; 2,105; 2,109; 2,475; \\ 2,539; 2,608; 3,175; 3,731; 3,960; 3,104; 1,775 \end{array} \right] = \underline{\underline{3,960 \mu m}}$$

$$R \downarrow = \max[R_i \downarrow] = \max \left[ \begin{array}{l} 4,128; 3,330; 3,207; 3,217; 2,692; 2,722; 3,054; \\ 2,539; 2,876; 2,305; 2,865; 2,308; 3,085; 3,359; \\ 2,343; 3,033; 2,443; 2,904; 3,142; 3,453; 2,814 \end{array} \right] = \underline{\underline{4,128 \mu m}}$$

$$R = \max[R_i] = \max \left[ \begin{array}{l} 4,128; 3,335; 3,957; 3,725; 3,177; 2,897; 3,055; \\ 2,719; 2,872; 2,301; 2,864; 2,383; 3,083; 3,362; \\ 2,457; 3,158; 2,604; 2,993; 3,507; 3,451; 3,521 \end{array} \right] = \underline{\underline{4,128 \mu m}}$$

## 9.4 Výsledky v ose X před repasí

Naměřené hodnoty jsou v příloze č.1

*Tabulka č.4 Výsledky kalibrace*

Rozlišitelnost	0,001	[mm]
Rozsah mikrometrického šroubu	20	[mm]
Měřený rozsah mikrometrického šroubu	20	[mm]
Necitlivost v ose: B	0,234	[μm]
Průměrná necitlivost v ose: $\bar{B}$	0,065	[μm]
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose: A	4,263	[μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↑	4,263	[μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↓	4,190	[μm]
Průměrná dvoustranná polohová odchylka v ose: M	0,680	[μm]
Dvoustranná systematická polohová odchylka v ose: E	0,840	[μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↑	0,520	[μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↓	0,840	[μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↑	3,960	[μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↓	4,128	[μm]
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R	4,128	[μm]

## 9.5 Výsledky v ose Y před repasí

Naměřené hodnoty jsou v příloze č.2

*Tabulka č.5 Výsledky kalibrace*

Rozlišitelnost	0,001	[mm]
Rozsah mikrometrického šroubu	20	[mm]
Měřený rozsah mikrometrického šroubu	20	[mm]
Necitlivost v ose: B	0,979	[μm]
Průměrná necitlivost v ose: $\bar{B}$	-0,749	[μm]
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose: A	4,802	[μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↑	4,362	[μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↓	3,742	[μm]
Průměrná dvoustranná polohová odchylka v ose: M	1,530	[μm]
Dvoustranná systematická polohová odchylka v ose: E	2,220	[μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↑	1,680	[μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↓	1,480	[μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↑	3,291	[μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↓	2,809	[μm]
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R	3,648	[μm]

## 9.6 Výsledky v ose X po repasi

Naměřené hodnoty jsou v příloze č.3

*Tabulka č.6 Výsledky kalibrace*

Rozlišitelnost	0,001 [mm]
Rozsah mikrometrického šroubu	20 [mm]
Měřený rozsah mikrometrického šroubu	20 [mm]
Necitlivost v ose: B	1,940 [μm]
Průměrná necitlivost v ose: $\bar{B}$	-0,666 [μm]
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose: A	5,996 [μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↑	5,319 [μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↓	5,845 [μm]
Průměrná dvoustranná polohová odchylka v ose: M	1,380 [μm]
Dvoustranná systematická polohová odchylka v ose: E	2,400 [μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↑	1,400 [μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↓	1,740 [μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↑	4,205 [μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↓	5,444 [μm]
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R	5,444 [μm]

## 9.7 Výsledky v ose Y po repasi

Naměřené hodnoty jsou v příloze č.4

*Tabulka č.7 Výsledky kalibrace*

Rozlišitelnost	0,001 [mm]
Rozsah mikrometrického šroubu	20 [mm]
Měřený rozsah mikrometrického šroubu	20 [mm]
Necitlivost v ose: B	0,500 [μm]
Průměrná necitlivost v ose: $\bar{B}$	-0,259 [μm]
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose: A	4,055 [μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↑	2,895 [μm]
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose: A ↓	4,055 [μm]
Průměrná dvoustranná polohová odchylka v ose: M	1,610 [μm]
Dvoustranná systematická polohová odchylka v ose: E	1,960 [μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↑	1,280 [μm]
Jednostranná systematická polohová odchylka v ose: E ↓	1,960 [μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↑	2,238 [μm]
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R ↓	2,736 [μm]
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose: R	2,736 [μm]

## 10 REPASE MIKROSKOPU PK3

Podstatou repase je obnova osvětlení mikroskopu. Původní zařízení bylo kolem 50 let staré a bylo realizováno jako jeden zdroj s příslušnými komponentami uvnitř kovové šasi (obr. 64). Osvětlení mikroskopu bylo zajištěno pomocí klasických žárovek s vláknem.



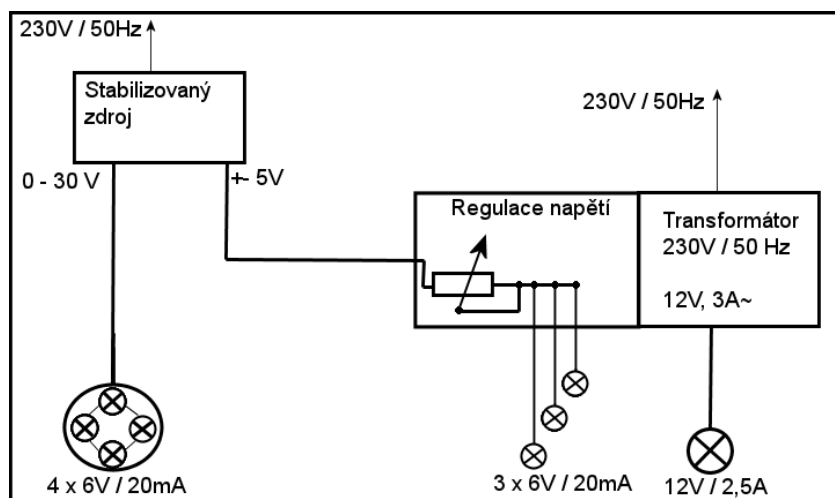
Obr. 64 Původní osvětlovací zařízení

### *Hlavní nevýhodou bylo:*

- Kovové šasi může při poruše izolace probíjet.
- Osvit žárovkami není stejnoměrný, v okuláru dochází k odleskům světla.
- Větší spotřeba energie oproti LED diodám.

### 10.1 Realizace repase

Návrh musí splňovat nároky na bezpečnost a komfort osvětlení okulárů mikroskopu. Proto jsme zvolili zařízení, které bude mít tyto potřebné parametry. Místo žárovek s vláknem jsme použili moderní vysocesvítivé bílé LED diody (obr. 66) s bezpečným napětím. Blokové schéma je na obrázku č. 65.



Obr. 65 Blokové schéma zapojení nového zařízení



- **Stabilizovaný zdroj** – obsahuje regulátor napětí od 0 do 30 voltů. Z důvodu možného překročení napětí na LED diodách (max. 24V) bylo nutné zapojit rezistor (není zakreslen) o výkonu 3W. Tím pádem napětí na diodách nepřesáhne povolenou mez.
- **Regulace napětí** – je napájena ze stabilizovaného zdroje stejnosměrným napětím 5V. Regulace je realizována potenciometrem.
- **Transformátor** – napájí klasickou žárovku.



Obr. 66 LED dioda, konektor



Obr. 67 Regulace napětí, transformátor (odkryto)



Obr. 68 Stabilizovaný zdroj EP 613

## 10.2 Finanční náročnost repase

Tabulka č.8 Finanční rozpočet provedené repase mikroskopu PK3

Název položky	Popis	Cena
6x L-E10 12V white	Dioda se závitem E10, bílá barva, 20mA, Typ. 4900mcd, Uf=12V, úhel 25°, teplota -40°..+80°	18 Kč
Drátový potenciometr	47Ω / 2W	78 Kč
Transformátor TR1	230V / 50Hz, 12V - 3A~	98 Kč
Odporový rezistor	3W	9 Kč
Zdroj EP 613	stejnosměrný zdroj 1x 0...30V/2,5A, 1x5V/0,5A 1x12V/0,5A LCD měř., rozměr 150x145x200 mm, 2,8kg	3 050 Kč
Ostatní položky	vodiče, plastová krabice, konektory, přepínače, svorkovnice	210 Kč
Celkem		3 463 Kč

Uvedené ceny jsou včetně DPH 19%

## 11 ZÁVĚR

Práce popisuje postup při kalibraci universálního měřicího mikroskopu pomocí laserové systému ML10 Gold Standart. Vlastní kalibraci předchází teoretická příprava, kde je popsán vznik a princip laseru, popis jednotlivých částí laserové měřicího systému firmy Renishaw, možné chyby, kterých se můžeme během měření dopustit a další měřicí periferie. Je zde také výňatek z normy ISO ČSN 230-2, kterou jsem použil jako postup při měření a následné vyhodnocení výsledků.

V praktické části podrobně popisují seřizování laserového systému doplněnou o fotografie pořízené během měření.

Při kalibraci bylo postupováno metodicky podle normy a pokynů vedoucího diplomové práce doc. Ing. Vladimíra Paty, Dr.. Měření proběhlo tak, jak bylo vytyčeno v zadání práce. Naměřené výsledky byly zkontrolovány jestli neobsahují extrémní hodnoty, které mohli vzniknout při měření. Nic takového se neprokázalo. Při měření po repasi v ose x mi pomáhal Bc. Aleš Prokop. Naměřené výsledky jsou srovnatelné s výsledky před

provedenou repasí. Při vyhodnocování výsledků kalibrace nebyly k dispozici žádné kalibrační listy výrobce universálního mikroskopu PK3. Jediný údaj, který můžeme srovnávat je rozlišitelnost ( $1\text{ }\mu\text{m}$ ) s průměrnou dvoustrannou polohovou úchylkou v ose M. Přičemž rozlišitelnost je údaj, který říká jaká nejmenší hodnota může být přístrojem indikována. V naměřených případech dopadla nejlépe osa x před renovací s hodnotou  $M=0,684\text{ }\mu\text{m}$ . V ostatních osách došlo k překročení hodnoty  $1\text{ }\mu\text{m}$  až o  $0,610\text{ }\mu\text{m}$ , což je vzhledem ke stáří mikroskopu uspokojivá hodnota. Dalším atribut A, což je dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose ukazuje nejlepší výsledek  $4,055\text{ }\mu\text{m}$  v ose y po renovaci. V ostatních naměřených osách se výsledek atributu A pohybuje od  $4\text{ }\mu\text{m}$  do  $6\text{ }\mu\text{m}$ . V ose x po renovaci dosahuje atribut A relativně nejhoršího výsledku. To je pravděpodobně zapříčiněno změnou obsluhy měření. Rozdíly výsledků mezi jednotlivými osami jsou vzhledem ke stáří stroje minimální.

Při kalibraci jsem se seznámil s laserovým systémem ML10 Gold Standart, získal praktické zkušenosti při nastavování a seřizování jednotlivých měřících prvků, zapojení měřicí ústředny Comet a převodu dat z softwaru Renishaw do programu Excel.

Nevýhodou universálního měřicího mikroskopu PK3 je jeho samotné čtení údajů. Před renovací docházelo k odleskům světla při osvětlování okulárů. Po renovaci tento jev zmizel, nicméně optické čtení zůstalo. Při déle trvající práci dochází u obsluhy k únavě oka a obtížnému čtení naměřených hodnot na stupnici. Výměna elektrických kabelů a zdroje přispěla ke větší bezpečnosti během užívání studenty. Závěrem lze tedy říci, že při přesunu mikroskopu nedošlo k poškození měřících částí, repase přispěla k většímu komfortu při měření a tím i k dosahování lepších výsledků a tak lze dílenský mikroskop PK3 doporučit k dalšímu užívání.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUSALA, Jaroslav. *Laser a jeho využití* [online]. c2004 [cit. 2008-01-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/presentation/static/lasery/laser.htm>>.
- [2] *Renishaw - Měření a kalibrace* [online]. c2001-2007 [cit. 2008-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://renishaw.cz/client/product/Czech/PGP-4.shtml>>.
- [3] ČSN ISO 230-2 : Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. 2. vyd. Praha : Český normalizační institut, 1999. 17 s.
- [4] *Comet : universální monitorovací systémy* [online]. [1999] [cit. 2008-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.cometsystem.cz/ms.htm>>.
- [5] Renishaw: laser calibration system. User guide. 2000-2002 (anglicky)
- [6] ENGST, Pavel, HORÁK, Milan. *Aplikace laserů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1989. 204 s. Populární přednášky o fyzice; sv. 34.
- [7] KALINOVÁ, Irena. *Rozvoj laseru ve strojírenství : prognostická studie*. Prah : ÚVTEI., 1988. 42 s. SIVO ; č. 2190
- [8] *Mezinárodní slovník termínů v legální metrologii*. [s.l.] : [s.n.], 2000. 18 s. česko-anglický.
- [9] MINITAB® Release 14 : statistický software pro Windows, průvodce uživatele. SC&C Partner spol. s r.o.. Brno : [s.n.], 2006. 67 s.
- [10] KRATOCHVÍL, Oldřich. *Základy elektrotechniky*. 1. vyd. Kunovice : Evropský polytechnický institut, 2004. 241 s. Učebnice středních škol. ISBN 80-7314-026-8.
- [11] KRČÁL, Martin, FARKAŠOVÁ , Blanka. *Bibliografické citace* [online]. c2004-2008 , 2007-12-19 [cit. 2008-04-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.citace.com>>.

## POUŽITÝ SOFTWARE



ACDSee 32

(výrobce: ACD Systems)



MINITAB® Release 14.1

(výrobce: Minitab Inc.)



Jasc Paint Shop Pro 9

(výrobce: Corel Corporation)



Microsoft Office 2003

(výrobce: Microsoft Corporation)



PC Translator 2007

(výrobce: LangSoft s.r.o.)



Windows XP Home Edition

(výrobce: Microsoft Corporation)



Renishaw Laser10 setup

(výrobce: Renishaw plc)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b>	Theodore Mainman	<b>Obr. 35</b>	Optika pro lineární měření
<b>Obr. 2</b>	Michelsonův interferometr	<b>Obr. 36</b>	Optika pro měření úhlů
<b>Obr. 3</b>	Interferující vlny na stínítku	<b>Obr. 37</b>	Pohled na PK3
<b>Obr. 4</b>	Interference vln	<b>Obr. 38</b>	Reálné sestavení optiky
<b>Obr. 5</b>	Laserová hlavice ML10 Gold Standart a XL80 (vpravo)	<b>Obr. 39</b>	Licenční ujednání
<b>Obr. 6</b>	Zadní panel laserové hlavice ML10	<b>Obr. 40</b>	Volba adresáře
<b>Obr. 7</b>	Polohy měřicí hlavy	<b>Obr. 41</b>	Tlačítko start
<b>Obr. 8</b>	Kompenzační jednotka EC10	<b>Obr. 42</b>	Ikona Linear measurement
<b>Obr. 9</b>	Vliv kompenzace podmínek prostředí na přesnost měření	<b>Obr. 43</b>	Zobrazení síly signálu laseru
<b>Obr. 10</b>	Program Renishaw Laser 10	<b>Obr. 44</b>	Seřizování paprsku
<b>Obr. 11</b>	Sestavení laserového interferometru pro lineární měření	<b>Obr. 45</b>	Laserový paprsek mimo terčik
<b>Obr. 12</b>	Laserová hlava o ose měření	<b>Obr. 46</b>	Princip seřizování
<b>Obr. 13</b>	Laserová hlava v pravém úhlu k ose měření	<b>Obr. 47</b>	Pohled do okuláru
<b>Obr. 14</b>	Laserová hlava v obecném úhlu vzhledem k ose měření	<b>Obr. 48</b>	Mikrometrický šroub v krajní poloze
<b>Obr. 15</b>	Mrtvý chod při lineárním měření	<b>Obr. 49</b>	
<b>Obr. 16</b>	Správné nastavení optiky pro minimální chybu mrtvé dráhy	<b>Obr. 50</b>	

<b>Obr. 17</b>	Kosinová chyba	<b>Obr. 51</b>	Zachycování jednotlivých poloh
<b>Obr. 18</b>	Znázornění Abbeho chyby	<b>Obr. 52</b>	Uspořádání optiky při měření osy Y před repasí
<b>Obr. 19</b>	Prvky používané pro lineární laserové měření	<b>Obr. 53</b>	Nastavení poloh
<b>Obr. 20</b>	Grafické znázornění vybraných definic ČSN ISO 230-2	<b>Obr. 54</b>	Pohled do okuláru
<b>Obr. 21</b>	Lineární dvojchodý unidirectionální cyklus	<b>Obr. 55</b>	
<b>Obr. 22</b>	Lineární dvojchodý bidirectionální cyklus	<b>Obr. 56</b>	
<b>Obr. 23</b>	Pendulární dvojchodý unidirectionální cyklus	<b>Obr. 57</b>	Schéma lineární měřicí optiky
<b>Obr. 24</b>	Pendulární dvojchodý bidirectionální cyklus	<b>Obr. 58</b>	Reálné uspořádání měřicí optiky
<b>Obr. 25</b>	Stojan laseru	<b>Obr. 59</b>	
<b>Obr. 26</b>	Seřizovací šrouby	<b>Obr. 60</b>	Sestavení optiky pro měření osy Y po repasí
<b>Obr. 27</b>	Vodováha při seřizování do roviny	<b>Obr. 61</b>	
<b>Obr. 28</b>	Integrovaná vodováha	<b>Obr. 62</b>	Grafické znázornění datového souboru
<b>Obr. 29</b>	Otočný korekční kroužek	<b>Obr. 63</b>	Minitab
<b>Obr. 30</b>	Rozmístění teplotních čidel	<b>Obr. 64</b>	Původní osvětlovací zařízení
<b>Obr. 31</b>	Čidla na kompenzační jednotce	<b>Obr. 65</b>	Blokové schéma zapojení nového zařízení
<b>Obr. 32</b>	USB Interface DX10	<b>Obr. 66</b>	LED dioda, konektor
<b>Obr. 33</b>	Monitorovací systém MS4+	<b>Obr. 67</b>	Regulace napětí, transformátor (odkryto)
<b>Obr. 34</b>	Teplotní čidlo Comet	<b>Obr. 68</b>	Stabilizovaný zdroj EP 613

## SEZNAM TABULEK

Tabulka č.1 Základní specifikace ML10 Gold

Tabulka č.2 Specifikace jednotky EC10

Tabulka č.3 Technické specifikace mikroskopu PK3

Tabulka č.4 Výsledky kalibrace

Tabulka č.5 Výsledky kalibrace

Tabulka č.6 Výsledky kalibrace

Tabulka č.7 Výsledky kalibrace

Tabulka č.8 Finanční rozpočet provedené repase mikroskopu PK3

## POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ



Fotoaparát Canon A560

(výrobce: Canon Inc.)



Laserový systém ML 10  
GOLD

(výrobce: Renishaw plc)



Notebook HP

(výrobce: Hewlett-Packard  
Development Company, L.P.)



Notebook Toshiba Satellite L40

(výrobce: Toshiba Corporation)



Monitorovací systém MS4+

(výrobce: COMET SYSTEM, s.r.o.)



Universální mikroskop PK3

(vyrobena v: SSSR.)

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – Osa x před repasí

Příloha č.2 – Osa y před repasí

Příloha č.3 – Osa x po repasí

Příloha č.4 – Osa y po repasí